

# **Nutzen und Grenzen von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen**

## **Dissertation**

zur Erlangung des akademischen Grades doctor rerum naturalium  
im Fach Psychologie

eingereicht an der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II  
der Humboldt-Universität zu Berlin

von  
Dipl.-Psych. Karen Krüger  
geboren am 26.10.1973 in Berlin

Präsident der Humboldt-Universität zu Berlin  
Prof. Dr. Christoph Marksches

Dekan der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II  
Prof. Dr. Wolfgang Coy

Gutachter:

1. Prof. Dr. Hartmut Wandke
2. Prof. Dr. Matthias Rötting
3. Jun.-Prof. Dr. Marc Hassenzahl

Tag der mündlichen Prüfung: 09.11.2007



## **Zusammenfassung**

Der erfolgreiche Einsatz von 3D-Anzeigen in zahlreichen Anwendungsgebieten sowie die Entwicklung autostereoskopischer Displays (ASD) ließen vermuten, dass 3D-Anzeigen die Gebrauchstauglichkeit und Attraktivität der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle optimieren können. Das Ziel dieser Arbeit bestand deshalb in der theoretischen Herleitung und empirischen Überprüfung nutzbringender Anwendungsmöglichkeiten für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen. Dabei wurden monoskopische 3D-Anzeigen mit monokularen Tiefenkriterien auf konventionellen Displays und (auto)stereoskopische 3D-Anzeigen mit einem plastischen 3D-Effekt betrachtet.

Zur Ableitung der Hypothesen zum Nutzen und zu den Grenzen von 3D-Anzeigen wurde ein auf andere Einsatzgebiete verallgemeinerbares Vorgehen vorgeschlagen. Dabei wurde für jede Teilaufgabe anhand eines Fragenkatalogs zu den Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen überprüft, inwieweit die Bearbeitung der Teilaufgabe davon profitiert, dass Informationen räumlich abgebildet werden. Die erwiesenen 3D-Vorteile wurden zu fünf Kategorien zusammengefasst: Integration, räumliche Kompatibilität, Aufmerksamkeitslenkung, Bildhaftigkeit und Attraktivität.

Der Schwerpunkt der empirischen Arbeit lag auf 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme (FAS), da ein wesentlicher 3D-Vorteil in der Möglichkeit einer räumlich kompatiblen Darstellung der Informationen über die Fahrzeugumgebung aus der Fahrerperspektive gesehen wurde. Am Beispiel einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten wurde nachgewiesen, dass die Vorteile von 3D-Anzeigen für FAS in einer Erhöhung der Attraktivität und Akzeptanz sowie in einer Verbesserung des unmittelbaren Verständnisses im Vergleich zu 2D-Anzeigen liegen. Gleichzeitig wurden mit optimal gestalteten 3D-Anzeigen keine Nachteile in der Wahrnehmungssicherheit und in der Ablenkungswirkung festgestellt. Anhand der Literaturanalyse und der empirischen Ergebnisse wurden Gestaltungshinweise für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen formuliert. Auch wenn sich der erwartete 3D-Vorteil einer räumlich kompatiblen Darstellung für FAS-Anzeigen mit einer konstanten Anordnung der Informationen nicht einstellte, so bleibt dies für Aufgaben mit einem kontinuierlichen Abgleich (z.B. Navigation) zu überprüfen. Die stereoskopische Darbietung von 3D-Anzeigen erbrachte keinen besonderen Nutzen. Das fahrzeugtaugliche ASD reduzierte sogar die Wahrnehmungsgeschwindigkeit.

Insgesamt sprechen die Ergebnisse für eine gezielte Verwendung bildhafter monoskopischer 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme und ausgewählte räumliche Funktionen, welche sich anhand von Begriffen und abstrakten Symbolen schwer erläutern lassen.



## Abstract

Successful applications of 3D-displays in different domains as well as the recent availability of autostereoscopic displays (ASD) suggest the assumption that 3D-displays could positively contribute to optimized usability and attractiveness of driver-vehicle-interfaces. Therefore, the objective of this thesis consisted of the theoretical deduction and empirical evaluation of useful applications for 3D-displays in vehicles. In doing so, conventional monoscopic 3D-displays with monocular depth cues and (auto)stereoscopic 3D-displays with a solid 3D-impression were employed.

For deducting hypotheses concerning the benefits and limits of 3D-displays in vehicles, a specific method of task analysis was proposed, which is applicable to other domains. Using a catalogue of confirmed advantages and disadvantages of 3D-displays each subtask was tested for its potential benefits from a 3D-information presentation. The proven 3D-advantages were summarized in five categories: integration, spatial compatibility, direction of attention, concreteness and attractiveness.

The empirical part of the thesis was mainly focused on the application of 3D-displays for driver assistance systems. It was presumed, that 3D-displays in vehicles are especially favorable for representing information of driver assistance systems about the vehicle surrounding in a 3D-perspective spatially compatible to the drivers view. Using a 3D-displays for adaptive cruise control (ACC) as an example, a general increase of attractiveness, acceptance and immediate comprehension for 3D-displays in comparison to conventional 2D-displays was confirmed. Simultaneously, well designed 3D-displays did not compromise perceptual safety and driver distraction. Design guidelines for 3D-displays in vehicles were concluded from the evaluation results and from literature analysis. Even though the expected 3D-benefit of spatially compatible information displays from the driver's perspective was not confirmed for driver assistance systems like ACC with a constant layout of information, it still remains to be tested for continuous matching tasks like navigational checking in vehicles. The stereoscopic presentation of 3D-displays did not show advantages. On the contrary, an in-car ASD even increased reaction times in comparison to monoscopic 3D-displays.

In summery, the results suggest a distinctive application of well designed concrete and monoscopic 3D-displays for driver assistance systems and selected spatial functions which are difficult to explain using abstract notions or symbols.



## **Danksagung**

Hiermit möchte ich mich bei allen bedanken, die mir über die Jahre beim Anfertigen dieser Arbeit hilfreich zur Seite gestanden haben.

Allen voran gilt mein besonderer Dank meinem Betreuer Herrn Prof. Dr. Hartmut Wandke. In unseren fachlichen Diskussionen gab er mir wichtige Anregungen zur inhaltlichen Ausrichtung der Arbeit und half mir in schwierigen Phasen, mich auf das Wesentliche zu konzentrieren. Auf seinen Rat und Zuspruch konnte ich jederzeit vertrauen.

Die Arbeit entstand im Rahmen des Projektes „ARTIST“ in der Forschungsabteilung „MMI (Mensch-Maschine Interaktion) - Konzepte und Systeme“ der Daimler AG. Dem Leiter der Abteilung Herrn Dr. Werner Reichelt und meinem Teamleiter Herrn Friedemann Kuhn danke ich dafür, die Rahmenbedingungen für diese Arbeit geschaffen zu haben.

Allen Mitstreitern im Projekt „ARTIST“ gebührt mein Dank für die engagierte und kooperative Zusammenarbeit. Herrn Dr. Markus Kreuzer und Herrn Dr. Wilhelm Wilke danke ich für die intensiven und anregenden Diskussionen, die mich in meiner Arbeit voranbrachten. Herrn Dr. Kai Geertsema und Herrn Christoph Meyer zu Kniendorf sei für die angenehme Zusammenarbeit bei der Konzeption und Durchführung der Akzeptanzbefragungen herzlich gedankt. Bedanken möchte ich mich außerdem bei den zahlreichen Diplomanden und Praktikanten, die uns im Projekt unterstützten. Mein ganz besonderer Dank gilt Carola Häring, Jan Viehweger, Thomas Fischer und Volker Pinsdorf.

Ein herzliches Dankeschön möchte ich meinen ehemaligen Kollegen Dr. Kay Schattenberg und Prof. Ralph Tille für die fachlichen Gespräche, die praktischen Ratschläge, die Motivationshilfen und die Korrektur von Teilen der Arbeit aussprechen. Meinem Studienkollegen Jörn Hurtienne danke ich für die konstruktiven Verbesserungsvorschläge in der Endphase der Arbeit.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Eltern, meinem Freund Sebastian und meiner Schwester Kerstin von Herzen bedanken. Sie haben mich die ganze Zeit in meinem Vorhaben bestärkt und mir jede Form der Unterstützung zukommen lassen. Meiner Mutter danke ich vor allem für die gründliche Korrektur der Arbeit und meinem Freund Sebastian für das angenehme Umfeld, welches er mir bereitet hat.





# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung .....</b>	<b><i>i</i></b>
<b>Abstract.....</b>	<b><i>iii</i></b>
<b>Danksagung.....</b>	<b><i>v</i></b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b><i>1</i></b>
<b>2 Definition von 3D-Anzeigen .....</b>	<b><i>5</i></b>
<b>3 Vor- und Nachteile von 3D-Anzeigen.....</b>	<b><i>9</i></b>
3.1 Vorteile von 3D-Anzeigen .....	9
3.1.1 Integration.....	9
3.1.2 Visualisierung von Relationen.....	13
3.1.3 Räumliche Kompatibilität .....	16
3.1.4 Aufmerksamkeitslenkung.....	19
3.1.5 Bildhaftigkeit.....	22
3.1.6 Attraktivität.....	28
3.2 Nachteile von 3D-Anzeigen.....	30
<b>4 Anwendungsmöglichkeiten von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen .....</b>	<b><i>33</i></b>
4.1 Aufgaben des Fahrers .....	34
4.2 Fragenkatalog zu den Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen .....	36
4.3 Auswahl einer Beispielaufgabe .....	38
4.4 Aufgabenanalyse zur Verwendung von 3D-Anzeigen.....	40
4.5 Fazit .....	43
<b>5 Gestaltungsaspekte von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen.....</b>	<b><i>45</i></b>
5.1 Nutzungskontext Fahrzeug .....	45
5.2 Ergonomische Anforderungen an 3D-Anzeigen in Fahrzeugen.....	47
5.3 Räumliche Tiefenwahrnehmung und Tiefenkriterien .....	48
5.3.1 Bildhafte monokulare Tiefenkriterien .....	49
5.3.2 Bewegungsinduzierte Tiefenkriterien.....	50
5.3.3 Okulomotorische Tiefenkriterien.....	51
5.3.4 Stereoskopische Disparität als Tiefenkriterium.....	51
5.3.5 Bewertung und Auswahl der Tiefenkriterien.....	53
5.3.6 Fazit .....	56
5.4 Stereoskopische Anzeigen .....	56
5.4.1 Einsatzbedingungen für stereoskopische Anzeigen .....	56
5.4.2 Technologien stereoskopischer Anzeigen.....	58
5.4.3 Maßeinheiten und Stereoparameter .....	60
5.4.4 Gestaltungshinweise für stereoskopische Anzeigen.....	60
5.4.5 Fazit .....	62
5.5 Geometrische Parameter einer virtuellen 3D-Szene.....	63
5.6 Perspektive.....	65
5.7 Visuelle Hilfsmittel .....	69

<b>6</b>	<b><i>Zusammenfassung und Fragestellungen .....</i></b>	<b>72</b>
<b>7</b>	<b><i>Experiment 1 – Monokulare Tiefenkriterien und stereoskopische Disparität als Gestaltungsparameter.....</i></b>	<b>73</b>
7.1	Fragestellung und Hypothesen .....	73
7.2	Methode .....	76
7.2.1	Versuchsplan.....	76
7.2.2	Versuchsteilnehmer .....	77
7.2.3	Apparatur .....	77
7.2.4	Versuchsreiz.....	79
7.2.5	Durchführung und Versuchsaufgaben .....	79
7.3	Ergebnisse.....	81
7.3.1	Abstand.....	81
7.3.2	Monokulare Tiefenkriterien.....	82
7.3.3	Stereoskopische Darstellung .....	83
7.3.4	Blickwechsel und stereoskopische Latenz .....	85
7.4	Diskussion.....	86
<b>8</b>	<b><i>Experiment 2 – Perspektive, stereoskopische Disparität und visuelle Hilfsmittel als Gestaltungsparameter.....</i></b>	<b>89</b>
8.1	Fragestellung und Hypothesen .....	89
8.2	Methode .....	93
8.2.1	Versuchsplan.....	93
8.2.2	Versuchsteilnehmer .....	94
8.2.3	Apparatur .....	94
8.2.4	Versuchsreize.....	95
8.2.5	Durchführung und Versuchsaufgabe .....	96
8.3	Ergebnisse.....	97
8.3.1	Höhenwinkel und Azimut.....	97
8.3.2	Stereoskopische Darstellung .....	98
8.3.3	Distanzsegmente.....	100
8.3.4	Subjektive Bewertung .....	101
8.4	Diskussion.....	102
<b>9</b>	<b><i>Entwicklung einer 3D-Anzeige für den Abstandsregeltempomaten..</i></b>	<b>105</b>
<b>10</b>	<b><i>Experiment 3 – Vergleich von 2D- und 3D- Anzeigen des Abstandsregeltempomaten im Straßenverkehr .....</i></b>	<b>109</b>
10.1	Fragestellung und Hypothesen .....	109
10.2	Methode .....	114
10.2.1	Versuchsplan.....	114
10.2.2	Versuchsteilnehmer .....	115
10.2.3	Apparatur .....	115
10.2.4	Versuchsreize.....	116
10.2.5	Durchführung und Versuchsaufgaben .....	117
10.3	Ergebnisse.....	117

10.3.1	Unmittelbares Verständnis.....	118
10.3.2	Akzeptanz .....	118
10.3.3	Höhenwinkel.....	120
10.4	Diskussion.....	121
<b>11</b>	<b><i>Experiment 4 – Vergleich von 2D- und 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten im Fahrsimulator.....</i></b>	<b>123</b>
11.1	Fragestellung und Hypothesen.....	123
11.2	Methode .....	131
11.2.1	Versuchsplan.....	131
11.2.2	Versuchsteilnehmer.....	132
11.2.3	Apparatur .....	132
11.2.4	Versuchsreize .....	134
11.2.5	Durchführung und Versuchsaufgaben .....	135
11.3	Ergebnisse .....	138
11.3.1	Visuelle Komplexität: Kontrolle der experimentellen Manipulation.....	139
11.3.2	Wahrnehmungssicherheit: Abweichung der Distanzschätzung, Reaktionszeiten und Bearbeitungsfehler .....	139
11.3.3	Ablenkungswirkung: Blickdaten und Fahrdaten .....	142
11.3.4	Subjektive Bewertung .....	146
11.4	Diskussion.....	148
<b>12</b>	<b><i>Experiment 5 – Vergleich von monoskopischen und autostereoskopischen 3D-Anzeigen im Fahrsimulator.....</i></b>	<b>153</b>
12.1	Fragestellung und Hypothesen.....	153
12.2	Methode .....	156
12.2.1	Versuchsplan.....	156
12.2.2	Versuchsteilnehmer.....	156
12.2.3	Apparatur .....	157
12.2.4	Versuchsreize .....	157
12.2.5	Durchführung und Versuchsaufgaben .....	158
12.3	Ergebnisse .....	158
12.3.1	Wahrnehmungssicherheit: Abweichung der Distanzschätzung, Reaktionszeiten und Bearbeitungsfehler .....	158
12.3.2	Ablenkungswirkung: Blickdaten und Fahrdaten .....	160
12.3.3	Subjektive Bewertung .....	164
12.4	Diskussion.....	166
<b>13</b>	<b><i>Allgemeine Diskussion und Ausblick.....</i></b>	<b>169</b>
	<b><i>Literaturverzeichnis .....</i></b>	<b>185</b>
	<b><i>Abkürzungsverzeichnis .....</i></b>	<b>209</b>
	<b><i>Anhang A – Experiment 1.....</i></b>	<b>211</b>
	<b><i>Anhang B – Experiment 2 .....</i></b>	<b>215</b>

<i>Anhang C – Experiment 3 .....</i>	<i>223</i>
<i>Anhang D – Experiment 4 .....</i>	<i>241</i>
<i>Anhang E – Experiment 5 .....</i>	<i>249</i>
<i>Eidesstattliche Erklärungen .....</i>	<i>257</i>

# 1 Einleitung

Die Entwicklung von leistungsfähigen Prozessoren, Grafikkarten, 3D-Modellierungs- und Anzeigeprogrammen, stereoskopischen Displays, 3D-Eingabegeräten und Audioanlagen mit Raumklang war die Voraussetzung dafür, dass sich seit dem Ende der 80er Jahre 3D-Anwendungen in immer mehr Einsatzgebieten durchsetzten. Dazu gehören CAD-Programme zur Konstruktion und Planung von Produkten und Gebäuden, Endoskope für minimal invasive medizinische Eingriffe, Teleoperationsroboter, Computerspiele, Animationsfilme, Flug- und Fahrsimulationen, virtuelle Umgebungen als Lernmedium und Medium für psychotherapeutische Behandlungen sowie 3D-Visualisierungen von menschlichen Organen, Molekülen und Daten aus wissenschaftlichen Experimenten und Simulationen. Komplexe Produktentwicklungsprozesse wie die von Fahr- oder Flugzeugen sind gegenwärtig ohne 3D-Anwendungen nicht mehr zu bewältigen. In aktuellen Premiumfahrzeugen werden hochauflösende Farbdisplays verbaut, auf denen 3D-Darstellungen gezeigt werden. Beispiele dafür sind 3D-Anzeigen von Navigationssystemen, Fahrerassistenzsystemen (z.B. Einparkhilfe, Abstandsregeltempomat und Nachtsichthilfe), Klang-, Fahrzeug- und Sitzeinstellungen, Icons sowie Menü- und Listeneinträgen. Darüber hinaus befinden sich autostereoskopische Displays (ASD) in der Entwicklung, welche einen plastischen 3D-Effekt erzeugen, ohne dass dazu eine störende Brille erforderlich ist. Zusammenfassend haben 3D-Anzeigen - unabhängig davon, ob sie auf konventionellen Displays mit Hilfe monokularer Tiefenkriterien oder auf (auto)stereoskopischen Displays dargestellt werden - ihren erfolgreichen Weg von prototypischen Anwendungen zur naturwissenschaftlich-technischen 3D-Visualisierung bis in die Fahrzeuge der Premiumklasse gefunden.

In dieser Arbeit wurde der Einsatz von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen mit der Erwartung verbunden, dass diese die Gebrauchstauglichkeit der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle optimieren und dadurch die stetig zunehmende Menge an komplexen Sicherheits-, Komfort-, Unterhaltungs- und Kommunikationsfunktionen beherrschbarer machen. Darüber hinaus wurde erwartet, dass die in den letzten Jahren im Kreise der *Human Factors* Experten aufgekommene Forderung nach einer Steigerung der Attraktivität von Benutzungsoberflächen (Hassenzahl, 2006; Jordan, 2000; Norman, 2004b) mit Hilfe von 3D-Anzeigen erfüllt werden kann. Demgegenüber besteht jedoch berechtigter Anlass zu der Befürchtung, dass attraktive 3D-Anzeigen die visuelle Aufmerksamkeit des Fahrers besonders stark beanspruchen und deshalb ablenkender wirken als konventionelle 2D-Anzeigen.

Die verfügbare Literatur zu 3D-Anzeigen in Fahrzeugen ergibt ein lückenhaftes Bild. Nicht einmal die in Japan inzwischen zur Standardausstattung von

Navigationssystemen gehörenden 3D-Karten aus der Vogelperspektive wurden bisher mit konventionellen 2D-Karten hinsichtlich ihres objektiven Nutzens verglichen. So berichten Watanabe und Kollegen (1997) zwar über die Entwicklung einer 3D-Navigationskarte, untersuchten jedoch ausschließlich die subjektive Präferenz von 3D- gegenüber 2D-Karten bei der Verfolgung einer Route in einem statischen Fahrsimulator. Sie wiesen eindrucksvoll die subjektive Präferenz von 3D-Karten nach. Ein potenzieller objektiver Nutzen von 3D-Karten bleibt jedoch aufgrund fehlender verfügbarer empirischer Untersuchungen fraglich. Green und Williams (1992) und Heller et al. (2003) zeigen in ihren Experimenten, dass in 3D-Anzeigen abstrakter Kreuzungsdarstellungen aus der Perspektive des Fahrers wichtige Details der Abbiegesituationen insgesamt schlechter erkannt werden als in einer Draufsicht. Eine Perspektive mit einem Höhenwinkel von ca. 45° erbringt bei Green & Williams (1992) jedoch etwas schnellere und genauere Reaktionen als die 2D-Draufsicht. Dieses Ergebnis kann als Hinweis darauf verstanden werden, dass 3D-Anzeigen mit geeigneten Perspektiven durchaus ein Potenzial für eine Verbesserung des Abgleichs der Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen mit der Außensicht bieten können. Tönnis und Kollegen (2006) definieren die Steuerung eines Fahrzeugs mit Lenkrad, Gas- und Bremspedal als 3D-Benutzungsschnittstelle. Die Anzeigen in Head-up-Displays (HUD) sind ihrer Meinung nach ein Anwendungsbeispiel von 3D-Anzeigen. Empirische Untersuchungen mit 3D-Anzeigen und Bedienung führte aber auch diese Forschergruppe nicht durch.

Obwohl 3D-Anzeigen in Fahrzeugen bereits eingesetzt werden, finden sich somit insgesamt nur wenige Quellen zu sinnvollen Anwendungsmöglichkeiten, konkreten Gestaltungshinweisen oder empirisch quantifizierten Vor- und Nachteilen gegenüber vergleichbaren 2D-Anzeigen. Hier setzt die vorliegende Arbeit an und hat zum Ziel, nutzbringende Anwendungsmöglichkeiten für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen theoretisch herzuleiten und empirisch zu überprüfen.

Gezielte Vergleiche von konkreten 2D- und 3D-Benutzungsoberflächen sind für den jeweiligen Anwendungsfall erforderlich, weil Untersuchungen in verschiedenen Einsatzgebieten zeigen, dass 3D-Vor- und Nachteile sehr stark von der Aufgabe und von der Gestaltung der Anzeigen, Bedienelemente und Interaktionen abhängig sind (Übersichten in St. John, Cowen, Smallman & Oonk, 2001; Ware, 2004; Wickens, Todd & Seidler, 1989). Zudem bestehen bei der Verwendung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen aufgrund der gleichzeitigen Fahrzeugführung restriktivere Anforderungen als in anderen Einsatzgebieten. Belastbare Aussagen zum Nutzen, zu den Risiken und zur Akzeptanz von 3D-Anzeigen und Bedienelementen in Fahrzeugen können deshalb ausschließ-

lich anhand von beispielhaften Benutzungsoberflächen und Aufgaben während der Fahrzeugführung getroffen werden.

Da die Steuerung eines Fahrzeugs lediglich in zwei Dimensionen (Längs- und Querverführung) erfolgt und räumliche Eingaben (z.B. Sitz- und Klangeinstellungen) nur in geringem Umfang erforderlich sind, wurde in dieser Arbeit angenommen, dass das größte Potenzial von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen in der räumlich kompatiblen Darstellung der Informationen von Fahrerassistenzsystemen aus der Perspektive des Fahrers liegt.

Im Einzelnen werden in der vorliegenden Arbeit folgende Fragen beantwortet:

- Für welche Aufgaben des Fahrers lassen sich 3D-Anzeigen prinzipiell nutzbringend einsetzen?
- Welche konkreten Vorteile lassen sich bei einer Verwendung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen nachweisen?
- Haben 3D-Anzeigen in Fahrzeugen Grenzen hinsichtlich der Wahrnehmungssicherheit und der Ablenkungswirkung?
- Sollten 3D-Anzeigen in Fahrzeugen monoskopisch oder autostereoskopisch dargeboten werden? Welchen Nutzen haben dabei autostereoskopische 3D-Anzeigen im Vergleich zu den Kosten ihrer technischen Realisierung?
- Welche Perspektive ist für 3D-Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen geeignet?

3D-Bedienelemente werden hier nicht betrachtet, da sie nicht zwingend zur Interaktion mit 3D-Anzeigen eingesetzt werden müssen und gerade für ungeübte Anwender die Bedienung erschweren können (vgl. Bowman, Kruijff, LaViola & Poupyrev, 2004; Shneiderman & Plaisant, 2005). Zahlreiche Autoren empfehlen deshalb für die Umsetzung der räumlichen Bedienung eine Reduktion der Freiheitsgrade und ausreichende haptische Rückmeldungen.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in einen theoretischen und einen empirischen Teil. Im theoretischen Teil werden in Kapitel 2 die wichtigsten Begriffe im Zusammenhang mit 3D-Anzeigen definiert. Kapitel 3 gibt ein Überblick über verfügbare Befunde zu Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen in verschiedenen Anwendungsgebieten. Die untersuchten 3D-Vorteile werden zu den Kategorien Integration, Visualisierung von Relationen, räumliche Kompatibilität, Aufmerksamkeitslenkung, Bildhaftigkeit und Attraktivität zusammengefasst. In Kapitel 4 wird ausgehend von einer Analyse der Aufgaben des Fahrers die Anzeige des Abstandsregeltempomaten als Anwendungsbeispiel für 3D-Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen ausgewählt. Die Teilaufgaben, welche bei der Nutzung des Abstandsregeltempoma-

ten erforderlich sind, werden an einem Fragenkatalog zu den erwiesenen Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen gespiegelt, so dass konkrete Hypothesen zum Nutzen und zu den Grenzen einer 3D-Darstellung abgeleitet werden können. Kapitel 5 informiert über wichtige Gestaltungsaspekte von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen. Hierzu werden die verfügbaren Befunde zur räumlichen Tiefenwahrnehmung und zur Gestaltung von 3D-Anzeigen für eine Anwendung im Fahrzeugkontext ausgewertet und überblicksartig dargestellt. Kapitel 6 führt die Fragestellungen für den empirischen Teil der Arbeit auf.

Im empirischen Teil werden in den Experimenten 1 (Kap. 7) und 2 (Kap. 8) offene Fragen zur Gestaltung von 3D-Anzeigen systematisch untersucht. Die Ergebnisse dieser Experimente fließen in die Gestaltung einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten ein (Kap. 9). In den Experimenten 3, 4 und 5 (Kap. 10, 11 und 12) wird am Beispiel dieser Anzeige überprüft, ob sich die erwarteten Vorteile von 3D-Anzeigen nachweisen lassen und ob Grenzen bezüglich der Wahrnehmungssicherheit und Ablenkungswirkung bestehen.

Im abschließenden Kapitel 13 werden der Nutzen und die Grenzen von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen vor dem Hintergrund der empirischen Ergebnisse diskutiert. Anwendungsmöglichkeiten und Gestaltungsparameter werden zusammenfassend aufgeführt. Schlussendlich wird ein Ausblick auf weiterführende Fragestellungen gegeben.



## 2 Definition von 3D-Anzeigen

In der vorliegenden Arbeit wird von 3D-Anzeigen gesprochen, sobald mindestens ein Tiefenkriterium in einer Anzeige enthalten ist, welches in der Lage ist, beim Betrachter einen räumlichen Tiefeneindruck zu erzeugen (vgl. Ware, 2004; Wickens et al., 1989). Um welches Tiefenkriterium oder welche Kombination mehrerer Tiefenkriterien es sich dabei handelt, ist nicht Gegenstand der Definition. Genauso wenig wie die empirische Frage, ob ein einzelnes Tiefenkriterium ausreicht oder mehrere Tiefenkriterien erforderlich sind. Perspektivische Anzeigen, die ausschließlich bildhafte monokulare Tiefenkriterien enthalten, werden nach dieser Definition bereits als 3D-Anzeigen bezeichnet (z.B. ein 3D-Objekt in einem CAD-Programm auf einem konventionellen Bildschirm), da sie einen räumlichen Tiefeneindruck vermitteln. Übliche Elemente graphischer Benutzeroberflächen wie Helligkeitsverläufe, Lichtkanten und Schatten an Objekten wie Zeigern, Icons, Listeneinträgen, Tasten und Eingabefeldern sowie sich verdeckende Fenster sind demzufolge ebenfalls 3D-Merkmale in einer Anzeige (Shneiderman & Plaisant, 2005; Ware, 2004). 3D-Anzeigen, die stereoskopisch präsentiert werden und dadurch einen plastischen Tiefeneffekt ausstrahlen (z.B. Filme in 3D-IMAX-Kinos, Bilder mit Rot-Grün-Brillen), werden in dieser Arbeit zur klaren Abgrenzung von perspektivischen 3D-Anzeigen mit bildhaften monokularen Tiefenkriterien als *stereoskopische 3D-Anzeigen* bezeichnet.

Der Begriff 3D wird keineswegs einheitlich verwendet. Häufig wird er auf stereoskopische 3D-Anzeigen eingeeengt, obwohl die stereoskopische Disparität nur eines unter vielen Tiefenkriterien ist. Zur Abgrenzung werden dann perspektivische 3D-Anzeigen mit bildhaften monokularen Tiefenkriterien als *Pseudo-3D* oder *2.5D* bezeichnet.

Die *Theorie der mehrfachen Tiefenkriterien* legt jedoch die in dieser Arbeit verwendete Definition von 3D-Anzeigen nahe. In dieser Theorie wird davon ausgegangen, dass ein räumlicher Tiefeneindruck durch das Zusammenwirken verschiedener Informationsquellen über den Raum – die Tiefenkriterien – entsteht (vgl. Goldstein, 1997). Dabei steigt die Intensität des räumlichen Tiefeneindrucks mit der Anzahl und der Stärke der Wirkung der in einer Anzeige enthaltenen Tiefenkriterien. Somit gibt es in der menschlichen Wahrnehmung keinen scharfen Schnitt zwischen nicht-räumlich und räumlich, sondern ein Kontinuum von der Fläche (2D) bis zum Raum (3D<sup>1</sup>). Es gibt bildhafte monokulare, bewegungsinduzierte, okulomotorische und stereoskopi-

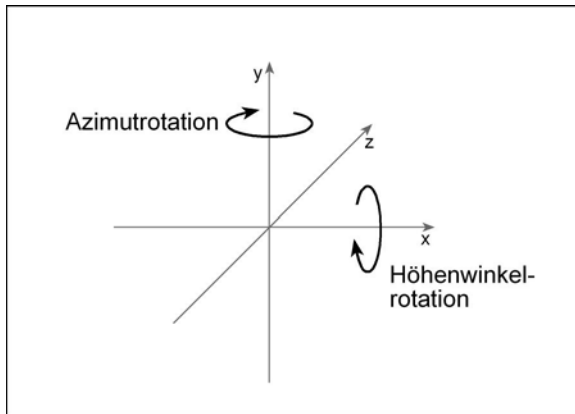
---

<sup>1</sup> Die Begriffe 3D, dreidimensional und räumlich werden synonym verwendet.

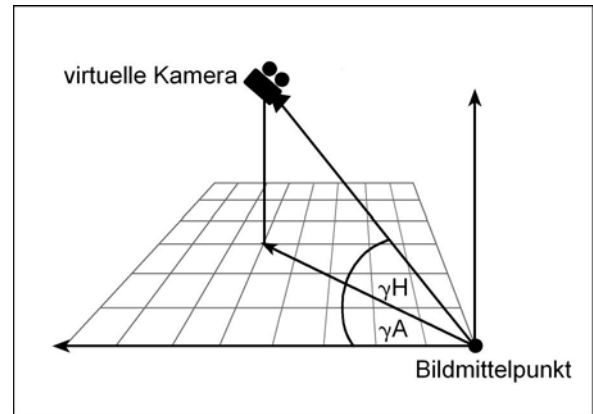
sche Tiefenkriterien, die mit unterschiedlicher Wirkungsweise und -stärke zur räumlichen Tiefenwahrnehmung beitragen (s. Abschn. 5.3).

3D-Anzeigen bestehen aus Abbildungen realer (z.B. Fotos, Filme) oder virtueller (z.B. 3D-Datenmodell eines Fahrzeugs) Objekte und Szenen. Diese werden in 3D-Modellierungsprogrammen im PC erstellt und nehmen ein abstraktes, realitätsnahes oder hyperrealistisch phantasievolles Erscheinungsbild und Verhalten an. Für ihre Bezeichnung haben sich die Begriffe *virtuelle Realität (VR)* oder *virtuelle Umgebung* durchgesetzt (Biocca, Kim & Levy, 1995). In virtuellen Umgebungen sind zwei Aspekte von Bedeutung, *Immersion* und *Präsenz* (Slater & Wilbur, 1997). Immersion ist ein technischer Begriff und beschreibt die Art und Anzahl der technischen Systeme, die eingesetzt werden, um die Realität nachzuempfinden und die Sinne des Anwenders zu stimulieren (z.B. stereoskopische Anzeigen, Rundumprojektion, haptisches Feedback über Datenhandschuhe, Erfassung von Kopfposition und Blickrichtung). Präsenz ist ein psychologischer Begriff und beschreibt, wie stark sich der Anwender in eine virtuelle Umgebung hineinversetzt fühlt (Barfield, Zeltzer, Sheridan & Slater, 1995; Schuemie, Straaten, Krijn & Mast, 2001). In dieser Arbeit beschränken sich die 3D-Anzeigen auf die so genannte *Desktop-VR*, d.h. auf nicht-immersive perspektivische Anzeigen mit und ohne stereoskopische Darbietung auf Bildschirmen, die maximal die Größe von PC-Monitoren erreichen. Die Erzeugung eines intensiven Präsenzerlebens bei der Betrachtung von 3D-Anzeigen wäre in Fahrzeugen ohnehin unangebracht, weil dadurch die Aufmerksamkeit des Fahrers zu stark auf die Anzeigen fokussiert werden würde. Es sei denn, man beabsichtigt, die Fenster des Fahrzeugs durch Monitore mit Projektionen der Fahrzeugumgebung zu ersetzen.

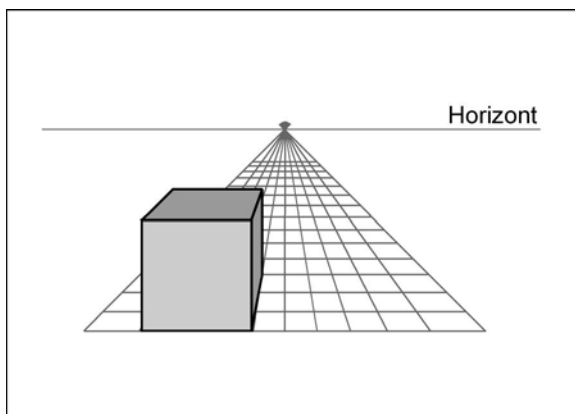
Eine fahrzeugbezogene Anwendung der *Augmented Reality (AR)*, d.h. der Überlagerung der realen Sicht durch virtuelle Bilder, sind *Head-up-Displays (HUD)*, welche eine Anzeigefläche über den äußeren Rand der Motorhaube projizieren. Technisch einfacher zu realisieren ist die Überlagerung von graphischen Elementen (z.B. Navigationspfeile) über ein Kamerabild, welches auf einem Bildschirm im Fahrzeug angezeigt wird. Beide Anwendungen sind nicht Gegenstand dieser Arbeit.



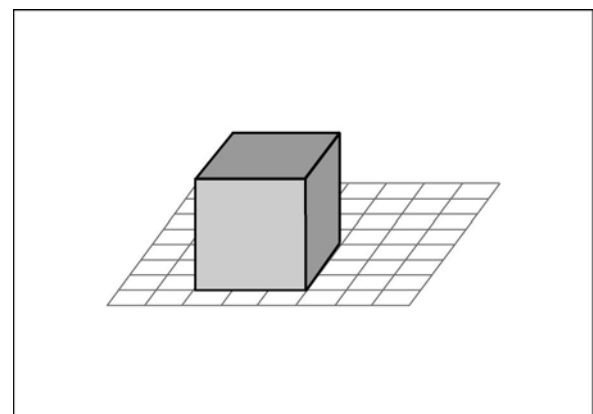
Koordinatensystem



$\gamma_H$  = Höhenwinkel und  $\gamma_A$  = Azimutwinkel ergeben die Perspektive.



Zentralperspektive



Orthogonale Parallelperspektive

### Abbildung 2-1: Koordinatensystem, Winkel und Perspektiven in 3D-Anzeigen

Die in dieser Arbeit für die Umsetzung von 3D-Anzeigen wichtigen Begriffe werden im Folgenden erläutert und sind in Abbildung 2-1 visualisiert. Zur Modellierung und Beschreibung von 3D-Anzeigen werden diese als in einem dreidimensionalen Koordinatensystem befindlich betrachtet. In dieser Arbeit werden die in der 3D-Modellierung üblichen Setzungen zur Bezeichnung der Achsen verwendet: x-Achse = Breite; y-Achse = Höhe; z-Achse = Tiefe. Als *Perspektive* wird in dieser Arbeit die Kombination aus Azimut- und Höhenwinkel in einer 3D-Anzeige bezeichnet, die den Blickwinkel der virtuellen Kamera auf den Bildmittelpunkt ergibt. Es wird dabei mit dem Begriff *Perspektive* die *Zentralperspektive* impliziert, in welcher alle Linien in der Tiefe in einem Fluchtpunkt konvergieren. Wird auf eine *Parallelperspektive* bzw. *orthogonale Parallelperspektive* referenziert, so wird dies explizit im Text erwähnt. Der *Azimutwinkel* wird durch eine Rotation um die y-Achse und der *Höhenwinkel* durch eine Rotation um die x-Achse verändert. Als 3D-Anzeigeprogramm wurde das Programm *DBView* verwendet, eine Eigenentwicklung der Daimler AG.



### **3 Vor- und Nachteile von 3D-Anzeigen**

In diesem Kapitel wird ein Überblick über die in der Literatur verfügbaren theoretischen und empirischen Befunde zu Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen in diversen Anwendungsgebieten gegeben. Die potenziellen Vorteile wurden zu sechs Kategorien zusammengefasst. Da nicht jeder der ursprünglich erwarteten 3D-Vorteile empirisch nachweisbar war, werden zugleich eingrenzende Bedingungen für eine Verwendung von 3D-Anzeigen angeführt. Anschließend werden die wichtigsten Nachteile von 3D-Anzeigen überblicksartig erläutert.

#### **3.1 Vorteile von 3D-Anzeigen**

Die Vorteile von 3D-Anzeigen werden nicht nur für kommerzielle Produkte, sondern häufig auch für Forschungsprototypen als gegeben vorausgesetzt. Zur Beschreibung der 3D-Vorzüge werden die Adjektive „natürlich“, „intuitiv“, und „ökologisch“ erwähnt und für im Markt befindliche Produkte wird auf deren langjährigen und erfolgreichen Einsatz verwiesen (z.B. Dassault Systems, 2003; McCloy & Stone, 2001; Robertson et al., 2000; Wickens et al., 1989). Gemessen an der weiten Verbreitung von 3D-Anzeigen über die verschiedensten Anwendungsgebiete wurden bisher nur wenige kontrollierte 2D/3D-Vergleiche durchgeführt, die eine empirische Überprüfung von 3D-Vorteilen zum Ziel hatten. Häufiger wurde ausschließlich über die Implementation von 3D-Anwendungen berichtet. Bestenfalls fanden Usability-Tests oder Vergleiche von 3D-Gestaltungsalternativen statt. Eine frühe Überblicksdarstellung zu 2D/3D-Vergleichsstudien geben Wickens et al. (1989), aktuelle, aber weniger ausführliche Sammlungen finden sich bei St. John et al. (2001), Cockburn & McKenzie (2002), Wickens & Hollands (2000), Preim (1999), Shneiderman & Plaisant (2005) und Ware (2004). Im Folgenden werden die verfügbaren Befunde zu 3D-Vorteilen berichtet und dazu in sechs Kategorien eingeteilt: Integration, Visualisierung von Relationen, räumliche Kompatibilität, Aufmerksamkeitslenkung, Bildhaftigkeit und Attraktivität.

##### ***3.1.1 Integration***

3D-Anzeigen dürften insbesondere dann von Vorteil sein, wenn die Aufgabe des Nutzers darin besteht, reale räumliche Informationen aus den drei Dimensionen Breite, Höhe und Tiefe integriert zu verarbeiten. Auch wenn in mehreren 2D-Einzelsichten alle Informationen enthalten sind, um eine interne 3D-Repräsentation aufzubauen, erfordert die mentale Integration der Einzelsichten kognitiven Aufwand (z.B. Wickens & Hollands, 2000), ein Mindestmaß an räumlichem Vorstellungsvermögen (z.B. Vicente, Hayes &

Williges, 1987) und ausreichende Erfahrung auf dem jeweiligen Fachgebiet (McWorther, Hodges & Rodriguez, 1991; Székely & Satava, 1999). 3D-Darstellungen haben den Vorteil, dass die Integration bereits in der Anzeige erfolgt und die Anwender die räumlichen Informationen direkt wahrnehmen können (*visual thinking*: Larkin & Simon, 1987; Shneiderman & Plaisant, 2005; Ware, 2004). Zudem entfällt eine aufwändige visuelle Suche über räumlich verteilte Ansichten und die damit verbundenen Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis, die verteilten Informationen für einen Vergleich zwischen den Ansichten vorübergehend zu speichern (Alexander & Wickens, 2003; Alexander, Wickens & Merwin, 2005; Park & Woldstad, 2000). Roscoe (1968) erwähnte in seinem *pinciple of display integration* erstmalig den Vorteil integrierter Anzeigen für die Bearbeitung integrativer Aufgaben. Integrative Aufgaben zeichnen sich dadurch aus, dass Informationen entlang der drei realen räumlichen Dimensionen bzw. von drei und mehr abstrakten Variablen im Zusammenhang verarbeitet werden. Wickens & Carswell (1995) griffen diesen Gedanken im *proximity compatibility principle* auf: „Displays relevant to a common task or mental operation (close task or mental proximity), should be rendered close together in perceptual space (close display proximity)“ (S. 473) und führten empirische Belege dafür an. 3D-Anzeigen sind nur eine Möglichkeit, Informationen integriert darzustellen. Weitere ergeben sich dadurch, dass in *Objektdisplays* (Wickens & Hollands, 2000) bzw. *Glyphen* (Ware, 2004) mehrere visuelle Merkmale (z.B. Form, Größe, Orientierung, Farbe, Textur und Bewegung) gemeinsam in einem Objekt abgebildet werden. So kann die Form eines Objektes (Kreis, Rechteck, Dreieck) beispielsweise eine inhaltliche Kategorie der Ergebnisse einer Recherche in einer Datenbank repräsentieren und dessen Größe die Anzahl der gefundenen Quellen.

Es werden integrative Aufgaben zu räumlichem Verständnis und Bedienhandlungen unterschieden. Das **räumliche Verständnis** kann sich auf die Form, Geometrie und Oberflächenstruktur komplexer 3D-Objekte (*shape understanding*: St. John, Cowen et al., 2001) und auf die relative räumliche Anordnung von Objekten in einer Szene (*spatial awareness*: Endsley, 1999; Olmos, Wickens & Chudy, 2000; Wickens, 2003; Wickens et al., 1989) beziehen. Beispiele finden sich bei der Planung militärischer Operationen, in der medizinischen Diagnostik, bei der Analyse komplexer Molekülstrukturen und bei der Orientierung in Landschaften mit Höhenunterschieden. St. John, Cowen und Kollegen (2001) ermittelten mit 3D- gegenüber 2D-Anzeigen schnellere und genauere Reaktionen bei der Ausführung zweier Typen integrativer Aufgaben zum räumlichen Verständnis. Im ersten Aufgabentyp identifizierten die Probanden, welches von drei in 2D oder 3D dargestellten Objekten einem 3D-Zielobjekt - bestehend aus zusammengesetzten Würfeln -

entsprach. Die drei Objekte unterschieden sich vom vorgegebenen Zielobjekt entweder in der Anzahl und Anordnung der Würfel oder waren im Höhen- bzw. Azimutwinkel rotiert. Der zweite Aufgabentyp beinhaltete vergleichbare angewandte Aufgaben mit Terrain-Visualisierungen. McWorther und Kollegen (1991) berichteten, dass Designstudenten ohne Erfahrung mit CAD-Programmen eine 3D-Ansicht gegenüber drei orthogonalen 2D-Ansichten bei der Beurteilung geometrischer Eigenschaften eines Objektes präferierten. Liu, Zhang und Chaffin (1997) untersuchten die computergestützte arbeitswissenschaftliche Analyse von Körperhaltungen bei der Arbeit. Die Ergänzung zweier Fotos von Körperhaltungen durch ein 3D-Menschmodell wirkte bei der Nachbildung komplexer asymmetrischer Haltungen in der Analysesoftware unterstützend, nicht aber bei einfachen symmetrischen.

**Räumliche Bedienhandlungen** können an realen und virtuellen 3D-Objekten und -Daten ausgeführt werden. Kommerziell erfolgreiche Anwendungen wie CAD-Programme zur Konstruktion und Planung von Bauteilen, Produkten, Produktionsanlagen und Bauwerken, Endoskope für minimal invasive chirurgische Eingriffe, Roboter zur Teleoperation von 3D-Objekten in weit entfernten, schwer zugänglichen oder gefährlichen Umgebungen werden häufig als einziger Beleg für die Vorzüge von 3D-Anzeigen angeführt (vgl. Kritik in Preim, 1999; Shneiderman, 2003). Nachgewiesen wurde der Vorteil von 3D-Anzeigen lediglich bei der Ausführung räumlicher Bedienhandlungen im Anwendungsgebiet der Flugzeugführung. Das Verfolgen einer vorgegebenen Flugroute erfolgt mit integrierten 3D-Anzeigen aus dem Blickwinkel des Piloten schneller und fehlerfreier als mit informationsgleichen koplanaren 2D-Anzeigen bestehend aus einer 2D-Draufsicht und einer 2D-Seitenansicht bzw. Ansicht von hinten (Haskell & Wickens, 1993; Wickens & Prevett, 1995).

Die Gemeinsamkeit der Aufgaben, in denen sich Vorteile von 3D-Anzeigen zeigen, besteht darin, dass lediglich grobe räumliche Urteile oder Bedienhandlungen erforderlich sind. Sobald bei der Bearbeitung von integrativen Aufgaben **präzise räumliche Urteile oder Bedienhandlungen** notwendig sind, verschwinden die Vorteile von 3D-Anzeigen oder kehren sich sogar in Nachteile um. Besonders gründlich wurden Flugsicherungsanzeigen untersucht. Fluglotsen, die den Luftverkehr in einem Sektor steuern, oder Piloten, die im freien Flug ihre Routen so planen, dass sie anderen Flugzeugen, Objekten in der Landschaft und ungünstigen Wetterlagen rechtzeitig ausweichen, integrieren räumliche Informationen (Olmos et al., 2000; Tavanti, Le & Dang, 2003). Vergleiche von 3D-Anzeigen mit informationsgleichen koplanaren 2D-Anzeigen ergaben selten Performanzvorteile der 3D-Anzeigen beim Erkennen und Ausweichen von potenziellen Kollisionen (Olmos et al., 2000). Häufiger wurden vergleichbare Leistungen erzielt (Tham & Wickens, 1993;

van Orden & Broyles, 2000) oder zeigten sich sogar Leistungseinbußen mit den 3D-Anzeigen (Alexander & Wickens, 2003; Alexander et al., 2005). Allerdings erwiesen sich 2D-Anzeigen als nachteilig, wenn die Höheninformationen nicht analog in einer weiteren 2D-Ansicht, sondern digital innerhalb der 2D-Draufsicht dargestellt waren (Ellis, McGreevy & Hitchcock, 1987; Tavanti et al., 2003) oder über einen zusätzlichen Bedienschritt angefordert werden mussten (Bemis, Leeds & Winer, 1988; Smallman, St. John & Oonk, 2001).

Nicht nur reale räumliche Informationen, sondern auch **abstrakte drei- und mehrdimensionale Daten** können in 3D-Anzeigen visualisiert werden, wenn mindestens drei Variablen verglichen oder im Zusammenhang betrachtet werden (Merwin, Vincow & Wickens, 1994; Wickens & Carswell, 1995). Dies ist bei der Visualisierung großer Datenmengen in wissenschaftlichen Studien, in technischen Simulationen und bei georeferenzierten Variablen (Meng, 2002) der Fall. Des Weiteren kann die dritte Dimension zur Kodierung weiterer Informationen wie wichtig/unwichtig oder jetzt/früher (Hicks, O'Malley, Nichols & Anderson, 2003; Stasko, 1992; Westerman, 1998) genutzt werden. Da mit Hilfe von 3D-Diagrammen selten ausschließlich ein globales räumliches Verständnis gefordert ist, sondern meist zudem präzise Werte abgelesen werden müssen, überwiegen auch hier die Nachteile im Vergleich zu mehreren 2D-Diagrammen (Barfield & Robless, 1989; Hicks et al., 2003; Hollands, Pierce & Magee, 1998; Jensen & Anderson, 1987) bzw. im Vergleich zu einem 2D-Diagramm mit mehreren Datenlinien (Wickens, LaClair & Sarno, 1995). Wickens, Merwin & Lin (1994) zeigten, dass die konkrete Gestaltung von 3D-Diagrammen Einfluss darauf hat, ob sich 3D-Vorteile ergeben. Sie verwendeten Gitternetzlinien als Hintergrund und Verbindungslinien zwischen Datenpunkten und Achsen und vermieden somit Probleme beim Ablesen genauer Werte in 3D-Diagrammen. Sie fanden im Vergleich zu zwei 2D-Diagrammen kürzere Bearbeitungszeiten bei integrativen Aufgaben und gleiche Bearbeitungszeiten bei Aufgaben mit fokussierter Aufmerksamkeit.

**Fazit.** Eine Integration realer räumlicher Informationen kann in Aufgaben zum räumlichen Verständnis oder zu räumlichen Bedienhandlungen erfolgen. Darüber hinaus können abstrakte Daten mit drei und mehr Variablen im Zusammenhang betrachtet werden. Da die Ergebnisse der aufgeführten Studien zeigen, dass selbst bei der Bearbeitung von Aufgaben, die eine Integration von 3D-Informationen erfordern, 3D-Anzeigen nicht automatisch die beste Gestaltungslösung darstellen. Deshalb muss für jede integrative Aufgabe, die durch 3D-Anzeigen unterstützt werden soll, im Einzelnen überprüft werden, inwiefern gleichzeitig präzise räumliche Urteile und Bedienhandlungen vorkommen. In diesen Fällen sind mehrere orthogonale 2D-Ansichten oder eine Kombination aus 2D- und 3D-Ansichten sinnvolle Alternativen.



### 3.1.2 Visualisierung von Relationen

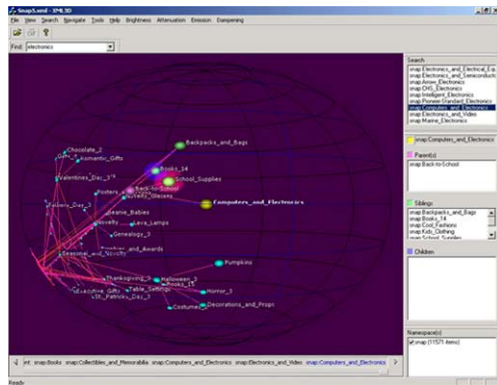
3D-Anzeigen können verwendet werden, um komplexe kausale, temporale und funktionale Relationen zwischen Informationen räumlich zu visualisieren und dadurch möglicherweise die Informationssuche in Datenbanken, digitalen Bibliotheken und im Internet übersichtlicher zu gestalten. Zahlreiche Autoren vermuten, dass in 3D-Anzeigen bei gleicher Bildschirmfläche mehr Informationen komprimiert und trotzdem erkennbar dargestellt werden können als in 2D-Anzeigen, sodass die Struktur großer Datenmengen besser zu überblicken ist (Hicks et al., 2003; Ridsen, Czerwinski, Munzner & Cook, 2000; Robertson, Card & Mackinlay, 1993; Ware & Franck, 1996; Westerman, 1998). Die perspektivische Verkürzung bewirkt eine „natürliche“ Verzerrung, sodass gleichzeitig Informationen im Fokus und Kontext wahrnehmbar sind. Synthetische Methoden wie der *Fisheye-View* können diesen Effekt noch verstärken (Furnas, 1986). Bederson (2000) gibt eine Übersicht über Anwendungsmöglichkeiten des Prinzips „*Fokus+Kontext*“. Aus den genannten Gründen wurden zahlreiche Prototypen zur 3D-Visualisierung von Netzwerken und Hierarchien umgesetzt (Übersichten in Rao et al., 1995; Robertson et al., 1993; Shneiderman & Plaisant, 2005; Ware, 2004; Wiss, Carr & Jonsson, 1998). Nachfolgend werden relevante empirische Befunde zu 2D/3D-Vergleichen dieser Prototypen berichtet.

**Netzwerke.** Ergebnisse von Recherchen in Datenbanken und im Internet bzw. Hyperlink-Strukturen von Internetseiten können als Datennetzwerke visualisiert werden, d.h. ein Informationsknoten ist ungeordnet mit mehreren anderen verbunden (vgl. Beispiel XML3D in Abb. 3-1). Die empirischen Ergebnisse aus drei Studien geben jedoch keine Hinweise darauf, dass eine netzwerkartige 3D-Visualisierung von Rechercheergebnissen die Informationssuche unterstützen würde. Sebrechts et al. (1999) ermittelten mit einem Rechercheprogramm, welches die Ergebnisse in Form von 3D-Netzwerken visualisierte, langsamere Reaktionszeiten bei der Informationssuche im Vergleich zu inhaltlich identischen Versionen mit einer textbasierten Ergebnispräsentation bzw. mit einer 2D-Netzwerkdarstellung. Eine 3D-Visualisierung der Beziehungen zwischen Dokumenten führte im Vergleich zu zwei textbasierten Programmen nicht dazu, dass mehr relevante Informationsquellen in gleicher Zeit gefunden wurden (Swan & Allan, 1998). Eine Kombination von 3D-Netzwerkvisualisierungen mit textbasierten Elementen beschleunigte zumindest für bekannte Suchkategorien die Informationssuche, wenn auch nicht für unbekannte Suchkategorien (Ridsen et al., 2000). Wenn Netzwerke trotzdem dreidimensional dargestellt werden sollen, ist eine stereoskopische Darbietung sinnvoll, da andernfalls die räumliche Ausdehnung der Netzwerke schwer zu

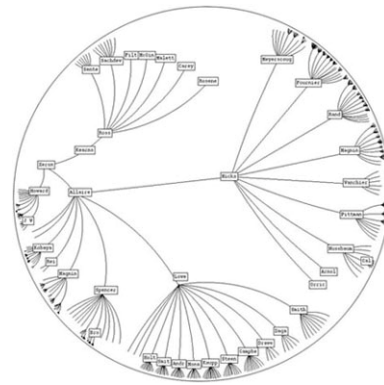
erkennen ist (Sollenberger & Milgram, 1993; Viswanathan & Mingolla, 2002; Ware & Franck, 1996; Xiao & Milgram, 1992).

**Hierarchien.** Seitdem in PC's Dokumente und Ordner in Datenverzeichnissen abgelegt werden, sind graphische Baumstrukturen allgemein bekannt. Eine 3D-Variante davon sind *Cone Trees* bzw. *Cam Trees* (Robertson, Mackinlay & Card, 1991). Da in diesen Anzeigen die Beschriftung der Einträge schwer erkennbar ist und die gewünschten Einträge erst nach einem Mausklick in den Vordergrund rotieren, wurden bei der Suche von Einträgen längere Bearbeitungszeiten und schlechtere subjektive Bewertungen als mit einer 2D-Variante gefunden (Cockburn & McKenzie, 2000). Entgegen der Erwartung erreichen 3D-Hierarchien wie *Cone/Cam Trees*, *Information Landscapes* (Anordnung von Quadern auf einer Ebene) oder *Information Cubes* (Verschachtelung von Quadern ineinander) bei vielen Einträgen schnell ihre Grenzen, vor allem wenn die Hierarchiestrukturen entweder etwas breiter oder etwas tiefer sind (Wiss et al., 1998). Der *Hyperbolic Tree*, der mit der *Fisheye*-Verzerrung sowohl flächig als auch räumlich umgesetzt werden kann, erbringt ebenfalls keine Vorteile bei der Informationssuche (Lamping, Rao & Pirolli, 1995; Nöller, 2001; Pirolli, Card & van der Wege, 2000). In einem weiteren Vergleich war der einfache *2D-Windows-Explorer* vier verschiedenen 3D-Visualisierungen von Hierarchien überlegen, sowohl in der Geschwindigkeit der Suche von Einträgen als auch im Verschaffen eines Überblicks über die Datenstruktur (Kobsa, 2004). Nur die *2D-Treemap* (vgl. Shneiderman, 2004) erzielte ähnliche Ergebnisse wie der 2D-Windows-Explorer. In Abbildung 3-1 finden sich Beispiele für 3D-Visualisierungen von Relationen.

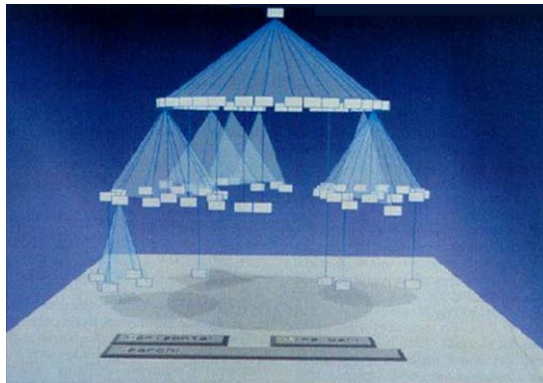
**Fazit.** Insgesamt weisen die aufgeführten Studien zwar einen Nutzen von graphischen Visualisierungen abstrakter Relationen aus, nicht aber speziell von 3D-Anzeigen. Wichtiger als die Visualisierung in 2D oder 3D ist eine optimale Gestaltung der Interaktion für die jeweilige Aufgabe und Nutzergruppe (Cockburn & McKenzie, 2000; Kobsa, 2004; Ridsen et al., 2000; Sebrechts et al., 1999; Swan & Allan, 1998). Es besteht somit keine empirische Grundlage für die häufig geäußerte Annahme, dass 3D-Anzeigen von abstrakten Relationen wie Menüstrukturen, langen Listen und Ergebnissen von Suchfunktionen einen objektiven Nutzen erbringen könnten.



XML3D aus Ridsen et al. (2000)



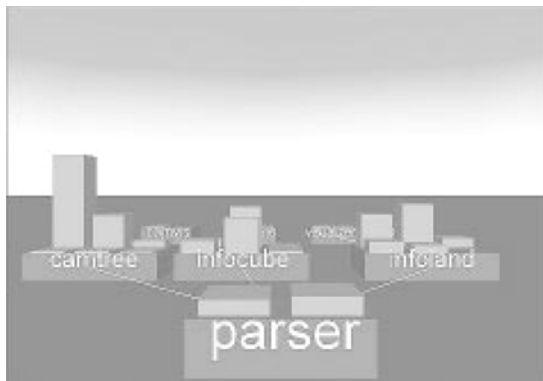
Hyperbolic Tree aus Lamping, Rao &amp; Pirolli (1995)



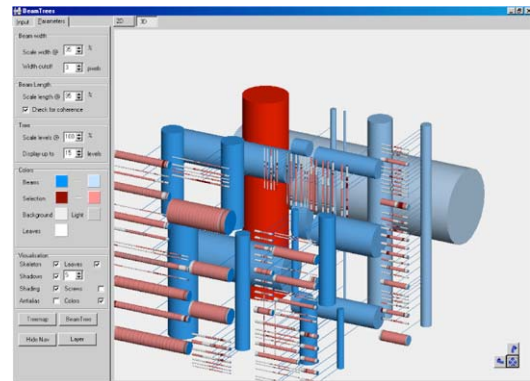
Cone Tree aus Robertson et al. (1991)



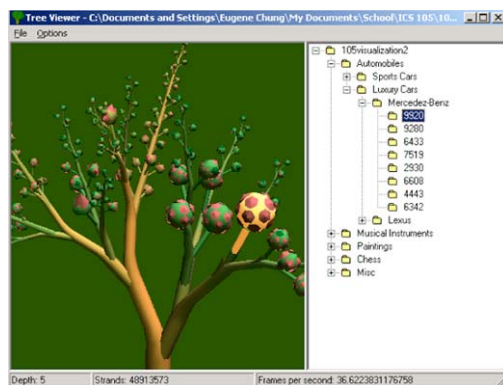
Information Cubes aus Wiss et al. (1998)



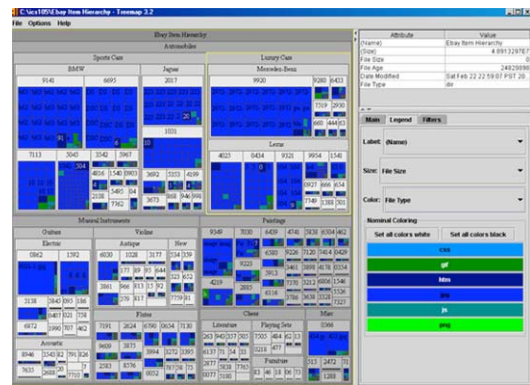
Information Landscapes aus Wiss et al. (1998)



Beam Trees aus Kobsa (2004)



Tree Viewer aus Kobsa (2004)



Treemap aus Kobsa (2004)

**Abbildung 3-1: Beispiele für 3D-Visualisierungen von Relationen**

### 3.1.3 Räumliche Kompatibilität

Die Gewährleistung der *Kompatibilität* ist eine wichtige ergonomische Grundregel bei der Gestaltung von Benutzungsoberflächen (Norman, 2002; Wickens & Hollands, 2000). Kompatibilität bedeutet, dass Realität<sup>2</sup>, Anzeige und Bedienung, mehrere Anzeigen oder mehrere Bedienvorgänge jeweils aufeinander abgestimmt sind (vgl. *stimulus-response-compatibility*: Fitts & Deininger, 1954; Fitts & Seeger, 1953). Kompatibilitätsvorteile zeigen sich, wenn a) zwischen einer Auswahl von Reizen und einer Auswahl von Reaktionsmöglichkeiten physikalische, räumliche, strukturelle, symbolische, semantische, auf die Sinnesmodalität und auf die Reizkodierung bezogene Gemeinsamkeiten bestehen (*dimensional overlap*) und wenn außerdem b) die Zuordnung jedes einzelnen Reizes zu einer bestimmten Reaktion den Populationsstereotypen entspricht (*mapping*) (vgl. Hommel & Prinz, 1997; Kornblum, Hasbroucq & Osman, 1990).

Kontinuierliche analoge Informationen (z.B. Abstand zwischen Fahrzeugen) bieten sich an, räumlich auf graphischen Displays angezeigt zu werden. Dabei kann sich die räumliche Kompatibilität sowohl auf statische (*Lage- und Richtungskompatibilität*) als auch auf dynamische Aspekte (*Bewegungskompatibilität*) beziehen (Roscoe, 1968; Wickens & Hollands, 2000). 3D-Anzeigen haben den Vorteil, Informationen bezogen auf drei Dimensionen räumlich kompatibel abzubilden, indem sie die Perspektive des Anwenders einnehmen. Objekte können in ihrer realen oder vorgestellten räumlichen Anordnung in der Breite, Höhe und Tiefe dargestellt werden. In dieser Arbeit wird erwartet, dass der Abgleich zwischen Realität, Anzeige und Bedienung mit räumlich kompatiblen Anzeigen einfacher ist, da mutmaßlich weniger mentale Transformationen (z.B. Rotation, Translation, Enkodierung) erforderlich sind. Dadurch reduziert sich der Aufwand der Wahrnehmung und Interpretation von Anzeigen sowie der Vorbereitung und Ausführung motorischer Operationen.

Ein Abgleich zwischen Realität und Anzeige erfolgt beispielsweise, wenn der Anwender eines Navigationssystems die eigene Position und Orientierung in der Umgebung ermittelt und bei laufender Zielführung überprüft, ob er auf dem richtigen Weg ist. Oder aber wenn er eine Entscheidung darüber trifft, ob die Darstellung des nächsten Abbiegepunktes im aktuellen Kartenausschnitt der Navigationsanzeige mit der Außensicht übereinstimmt und im Falle der Übereinstimmung das nächste Abbiegemanöver einleitet. Eine 2D-Draufsicht von Kartendarstellungen in Navigationssystemen ist im Vergleich zur

---

<sup>2</sup> An die Stelle der Realität kann auch ein mentales Modell der Realität oder eines vorgestellten Sachverhaltes treten. Dies ist im Folgenden immer impliziert, wenn die Realität erwähnt wird.

Außensicht um ca. 80° Höhenwinkel rotiert und eventuell auch im Azimutwinkel. Aus dem Alltag ist bekannt, dass mentale Rotationen - insbesondere des Azimutwinkels - mit 2D-Karten schwer fallen (Downs & Stea, 1982). Die Begriffe Azimut- und Höhenwinkel wurden in Abschnitt 2 definiert und in Abbildung 2-1 aufgezeigt.

Im Bereich der Flugzeugführung wurde für den Abgleich einer elektronischen Karte mit der Außensicht der Begriff *navigational checking* eingeführt (Hickox & Wickens, 1999; Schreiber, Wickens, Renner, Alton & Hickox, 1998). Diese und ähnliche Aufgaben wurden umso schneller und fehlerfreier gelöst, je geringer die Abweichung der Azimutwinkel bzw. die Abweichung der Orientierung der Karte in der 2D-Bildebene von der des Anwenders war (Aretz, 1991; Aretz & Wickens, 1992; Goldberg, MacEachren & Korval, 1992; Gugerty & Brooks, 2004; Levine, 1982; Schreiber et al., 1998). Darüber hinaus wurden umso bessere Leistungen gemessen, je geringer die Abweichung zwischen den Höhenwinkeln der Außensicht und der Kartendarstellung war (Eley, 1988; Goldberg et al., 1992; Hickox & Wickens, 1999; McCormick, Wickens, Banks & Yeh, 1998; Schreiber et al., 1998). Dabei wurde festgestellt, dass die Differenz der Auflösungen in der Tiefe die Varianz sogar noch besser aufklärt als die Differenz der Höhenwinkel (Goldberg et al., 1992; Hickox & Wickens, 1999; Schreiber et al., 1998). Das bedeutet, dass bei flachen Höhenwinkeln der Außensicht ( $< 45^\circ$ ) die gleiche Winkelabweichung zu größeren Differenzen in der Auflösung und damit zu stärkeren Leistungseinbußen führt als bei großen Höhenwinkeln ( $> 45^\circ$ ).

Obwohl perspektivische 3D-Kartendarstellungen seit mehreren Jahren zur Standardausstattung japanischer Navigationssysteme gehören und inzwischen auch zunehmend in Europa und den USA Verwendung finden, sind bisher keine empirischen Befunde darüber verfügbar, ob Probanden mit 3D-Kartendarstellungen in Fahrzeugen bessere Navigationsleistungen (z.B. weniger Abbiegefehler, kürzere Navigationszeiten) oder bessere Leistungen bei Aufgaben zum *navigational checking* zeigen. Die Ergebnisse aus dem Bereich der Flugzeugführung lassen jedoch den Schluss zu, dass eine kontinuierliche Rotation der Anzeige mit dem Azimut- und Höhenwinkel des Betrachters auch im Fahrzeug optimale Leistungen beim Kartenabgleich garantieren. Die Anpassung des Höhenwinkels der Anzeige an den Blickwinkel der Außensicht ist in Fahrzeugen sogar noch ernster zu nehmen als in Flugzeugen, da die Fahrerperspektive flacher ist als die eines Piloten.

Die Überlegungen zum Abgleich der Informationen einer Anzeige mit der Außensicht lassen sich von den Navigationssystemen auf andere Fahrerassistenzsysteme übertragen. Oulasvirta und Kollegen (2005) schreiben folgenden Aufgaben die Ausführung eines Abgleichs zu: Identifizieren, Widererkennen,

Orientieren und Navigieren. Auch bei der Nutzung von Abstandsregeltempomat, Einparkhilfe und Nachtsichthilfe vergleicht der Fahrer eine Anzeige mit der Außensicht und führt abhängig davon sein Fahrzeug. Darüber hinaus wurde der robuste Effekt der mentalen Azimutrotation bereits beim Vergleich einfacher 2D-Polygone, 3D-Objekte und Buchstaben mit unterschiedlichen Orientierungen (Barfield, Sandford & Foley, 1988; Brown & Gallimore, 1995; Cooper, 1976; Cooper & Shepard, 1973; Pylyshyn, 1979; Shepard & Metzler, 1988; Shepard & Metzler, 1971) gefunden. Gleiches gilt bei Urteilen über einfache Objekte, die in ihrer Azimutrotation von der kanonischen Orientierung (z.B. Norden-oben, Bewegungsrichtung-oben) abweichen (Cooper & Shepard, 1975; Shepard & Hurwitz, 1984). Shepard und Metzler (1971) untersuchten einfache 3D-Objekte, die in verschiedenen Höhenwinkeln abgebildet waren und fanden einen robusten Effekt der Höhenwinkelrotation.

Trotz aller Leistungseinbußen, die aufgrund abweichender Azimut- und Höhenwinkel nachgewiesen wurden, stellt eine 2D-Draufsicht, in der die Bewegungsrichtung des Fahrers oben angezeigt wird, eine sinnvolle Alternative dar, wenn 3D-Anzeigen aus Aufwandsgründen nicht realisierbar sind. Es existieren kulturelle Standards, dass Informationen, die auf einem vertikalen Display oben abgebildet sind, in der Realität als vorn befindlich interpretiert werden (Franklin & Tversky, 1990; McCarley & He, 2001; Norman, 2002; Shepard & Hurwitz, 1984). Ebenso wird die Vorwärtsbewegung eines Bedienelementes mit einer Bewegung nach oben auf einem Display assoziiert.

Ob räumlich kompatible *egozentrische* 3D-Anzeigen (d.h. aus der Position und aus dem Blickwinkel des Betrachters) wirklich einen Vorteil bringen, hängt davon ab, ob der Bezugsrahmen der Aufgabe auch egozentrisch ist (Aretz, 1991; Barfield, Rosenberg & Furness, 1995; Olmos et al., 2000; Wickens, Liang, Prevett & Olmos, 1996). Eine Aufgabe mit egozentrischem Bezugsrahmen bezieht sich immer auf die Position und Orientierung des Anwenders (z.B. rechts/links, über/unter, vorn/hinten, nah/fern). Dies trifft auf Aufgaben zu, die einen Abgleich erfordern wie z.B. die mentale Rotation, das navigational checking und Bedienaufgaben. Bei letzteren erzielen Probanden bessere Leistungen, wenn die Perspektive der Anzeige mit der Orientierung der Steuerungsachsen der Bedienelemente übereinstimmt. Dies war beispielsweise beim Verfolgen eines Objektes bzw. Pfades im Raum (*3D-Tracking*: Kim, Ellis, Tyler, Hannaford & Stark, 1987), bei der Fortbewegung von einem Objekt zum nächsten im Raum (McCormick et al., 1998) und beim Verfolgen einer vorgegebenen 3D-Flugroute (Haskell & Wickens, 1993; Olmos et al., 2000; Wickens & Prevett, 1995) gegeben. Die Nachteile egozentrischer 3D-Anzeigen bestehen darin, dass nicht mehr Informationen gezeigt werden als der Betrachter ohnehin wahrnimmt und dass bei flachen egozentrischen

Höhenwinkeln wie der Fahrerperspektive die Verkürzung in der Tiefe dazu führen kann, dass wesentliche 3D-Objektmerkmale langsamer oder gar nicht erkannt werden (Green & Williams, 1992; Heller et al., 2003).

Aufgaben mit *exozentrischem* Bezugsrahmen, d.h. mit Bezug auf ein allgemein gültiges Verständnis der Welt (z.B. Norden, Süden, Osten, Westen), werden durch exozentrische 2D- oder 3D-Anzeigen unterstützt. In diesen befindet sich die Position der virtuellen Kamera über und/oder hinter der des Betrachters, sodass ein größerer Bildausschnitt sichtbar ist als in einer egozentrischen „Schlüsselloch-Perspektive“ (vgl. Woods, 1984). Aus diesem Grund beschleunigen exozentrische im Vergleich zu egozentrischen Anzeigen die visuelle Suche bei der Auswahl von Navigationszielen (z.B. McCormick et al., 1998) und beim Erkennen von dynamischen Hindernissen (z.B. Olmos et al., 2000). Sie verbessern die aktuelle Übersicht und Orientierung in räumlichen Anordnungen (Olmos et al., 2000) und steigern das globale Verständnis der Struktur räumlicher Anordnungen (z.B. McCormick et al., 1998). Wenn exozentrische Anzeigen einen festen Bezugsrahmen beibehalten, erleichtern sie die Kommunikation über räumliche Anordnungen (vgl. Aretz, 1991; Wickens, 1999; Wickens et al., 1996) und den Aufbau räumlichen Übersichtswissens (Aretz, 1991; Barfield, Rosenberg et al., 1995; Wickens et al., 1996).

**Fazit.** Angewendet auf die Gestaltung von 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme und für räumliche Eingaben im Fahrzeug, die einen Abgleich zwischen Außensicht und Anzeige bzw. zwischen Anzeige und Bedienung erfordern, bieten *egoreferenzierte* 3D-Perspektiven (Aretz, 1991; Barfield, Rosenberg et al., 1995; Wickens, 1999; Wickens et al., 1996; Wickens & Prevett, 1995) insgesamt einen erfolgsversprechenden Kompromiss. Aufgrund einer im Vergleich zum Blickwinkel des Betrachters leicht erhöhten und nach hinten versetzten exozentrischen Kameraposition ermöglichen sie einen Informationsgewinn, verringern die Verkürzung in der Tiefe und begrenzen mentale Rotationen wegen eines egozentrisch rotierten Azimutwinkels und eines nur leicht vergrößerten Höhenwinkels.

### 3.1.4 Aufmerksamkeitslenkung

Obwohl sich die klassische Aufmerksamkeitsforschung weitgehend auf zweidimensionale Versuchsreize beschränkt, wurden in den letzten Jahren zahlreiche empirische Nachweise für eine Verteilung der Aufmerksamkeit in der Tiefe gefunden (Anderson & Kramer, 1993; Arnott & Shedden, 2000; Atchley & Kramer, 2000; Atchley, Kramer, Anderson & Theeuwes, 1997; Chau & Yeh, 1995; He & Nakayama, 1995; Marrara & Moore, 2000; Nakayama & Silverman, 1986; Theeuwes, Atchley & Kramer, 1998). Die Reaktion auf einen Zielreiz dauert länger, wenn sich dieser vom Hinweisreiz in

seiner Position in der Tiefe unterscheidet, als wenn sich Hinweis- und Zielreiz in gleicher Tiefe befinden. In den zuvor aufgeführten Studien wurde die Tiefe über die stereoskopische Disparität auf PC-Monitoren operationalisiert. Die gleichen Aufmerksamkeitseffekte zeigten sich aber auch mit realen räumlichen Szenen (Couyoumdijan, Di Nocera & Ferlazzo, 2003; Downing & Pinker, 1985; Gawryszewski, Riggio, Rizzolatti & Umitlá, 1987), mit monokularen Tiefenkriterien (Han, Wan & Humphreys, 2005; Robertson & Kim, 1999; Viswanathan & Mingolla, 2002, Exp. 1) und mit Kombinationen von stereoskopischer und monoskopischer Tiefe (Atchley & Kramer, 2001; Viswanathan & Mingolla, 2002).

Bei der Verwendung der Tiefe zur Kodierung von Informationen sind folgende Eigenschaften der Aufmerksamkeitsverteilung in der Tiefe zu beachten:

- Die Tiefenunterschiede können sowohl zwischen einzelnen Objekten (z.B. Arnott & Shedden, 2000) als auch zwischen parallel zur Bildebene der Netzhaut angeordneten Oberflächen (z.B. Atchley & Kramer, 2000; Theeuwes et al., 1998) bestehen.
- Innerhalb von in die Tiefe auslaufenden Objekten oder Oberflächen entfällt der Aufwand der Aufmerksamkeitsverlagerung (Atchley & Kramer, 2001; He & Nakayama, 1995; Marrara & Moore, 2000; Moore, Elsinger & Lleras, 2001; Robertson & Kim, 1999), außerhalb werden Reize in anderen Tiefenebenen abgeschwächt oder ausgeblendet (Atchley & Kramer, 2000; Chau & Yeh, 1995; Nakayama & Silverman, 1986; Theeuwes et al., 1998).
- Die Aufmerksamkeit verteilt sich entlang eines Gradienten, d.h. je größer die Distanz in der Tiefe, desto länger dauert deren Verschiebung (Anderson & Kramer, 1993; Arnott & Shedden, 2000; He & Nakayama, 1995, Exp. 3; Marrara & Moore, 2000).
- Der Aufmerksamkeitsfokus ist beobachterzentriert (Anderson & Kramer, 1993; Arnott & Shedden, 2000; Atchley et al., 1997; Couyoumdijan et al., 2003, Exp. 2; Downing & Pinker, 1985; Gawryszewski et al., 1987; Theeuwes et al., 1998, Exp. 3), d.h. die Aufmerksamkeit wird schneller von fern auf nah als umgekehrt gewechselt. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn die Aufmerksamkeit auf einzelne Orte und nicht auf ganze Flächen gerichtet ist (Theeuwes et al., 1998). Es wurde ausgeschlossen, dass dieser Effekt auf asymmetrischen Vergenz- und Akkomodationsbewegungen beruht.
- Die räumliche Aufmerksamkeit ist handlungszentriert (Couyoumdijan et al., 2003). Der Aufmerksamkeitswechsel dauert bei gleichen Distanzen zwischen peripersonalem (bis 1m, Greifraum) und extrapersonalem Raum (größer 1m) länger als innerhalb der beiden.



Angewendet auf die Gestaltung von 3D-Anzeigen bringt die Aufmerksamkeitsverlagerung in der Tiefe einerseits Vorteile durch deren Nutzung für eine Hervorhebung, Kodierung und Separierung von Informationen. Nähere Objekte könnten wichtigere, aktuellere oder in höheren Ebenen einer Hierarchie befindliche Informationen kontinuierlich oder in mehreren Tiefenstufen repräsentieren. Zudem könnte die Tiefe einer diskreten Hervorhebung dienen, d.h. eine gerade ausgewählte, aktive oder wichtige Information (z.B. Warn- und Fehlermeldungen) befindet sich näher am Betrachter als alle anderen Informationen. Andererseits entstehen durch die Tiefe gewisse Nachteile. Mehr Optionen für eine Aufmerksamkeitsverteilung können den Wahrnehmungsaufwand erhöhen.

Eine Kodierung durch stereoskopische Tiefe ist besonders geeignet, wenn sich die hervorzuhebenden Informationen graphisch nur wenig vom Hintergrund unterscheiden, der Hintergrund ausgeblendet und die Lesbarkeit (z.B. durch Helligkeitsveränderungen) nicht beeinträchtigt werden sollen. In Kombination mit einer Farbkodierung ist die separierende Wirkung der stereoskopischen Disparität noch stärker (Chau & Yeh, 1995; Nakayama & Silverman, 1986; Theeuwes et al., 1998). Da in den aufgeführten Studien große Disparitätsunterschiede von ca. 20 Bogenminuten zur Separierung in der Tiefe verwendet wurden, bleibt offen, ob kleinere Disparitäten, die auf autostereoskopischen Displays in Fahrzeugen darstellbar sind, vergleichbare Effekte erzielen.

Es darf nicht unerwähnt bleiben, dass die Aufmerksamkeit in einigen Studien „tiefenblind“ war (Arnott & Shedden, 2000, Exp. 3; Atchley et al., 1997, Exp. 2; Ghirardelli & Folk, 1996; Iavecchia & Folk, 1994; Marrara & Moore, 2000, Exp. 1). Fehlende Tiefeneffekte wurden zum einen damit begründet, dass aufgrund einer geringen Aufgabenschwierigkeit keine Aufmerksamkeitsfokussierung stattfand (Arnott & Shedden, 2000; Atchley et al., 1997). Zum anderen erlaubten zu kurze Darbietungszeiten stereoskopischer Reize möglicherweise keine eindeutige Tiefenwahrnehmung (Marrara & Moore, 2000).

Im Zusammenhang mit der Aufmerksamkeitsverteilung des Fahrers zwischen Außensicht und Informationen im Fahrzeuginnenraum werden häufig die Vor- und Nachteile von *Head-up Displays (HUD)* diskutiert. Diese bieten die Möglichkeit, fahrtbezogene, seltene und kritische Informationen (z.B. Ausgaben von Fahrerassistenzsystemen, Abbiegepeile und Warninformationen) in die Außensicht des Fahrers zu integrieren und somit zusätzliche Aufmerksamkeitsverlagerungen in den Fahrzeuginnenraum zu vermeiden. Kontaktanaloge HUD, die Informationen in der Realität genau an dem Ort überlagern, wo sie benötigt werden (z.B. Abbiegepeil direkt an der nächsten Kreuzung), befinden sich derzeit aber erst im Stadium aufwändiger Prototypen. Heutige fahrzeugtaugliche HUD projizieren lediglich ein virtuelles Bild in

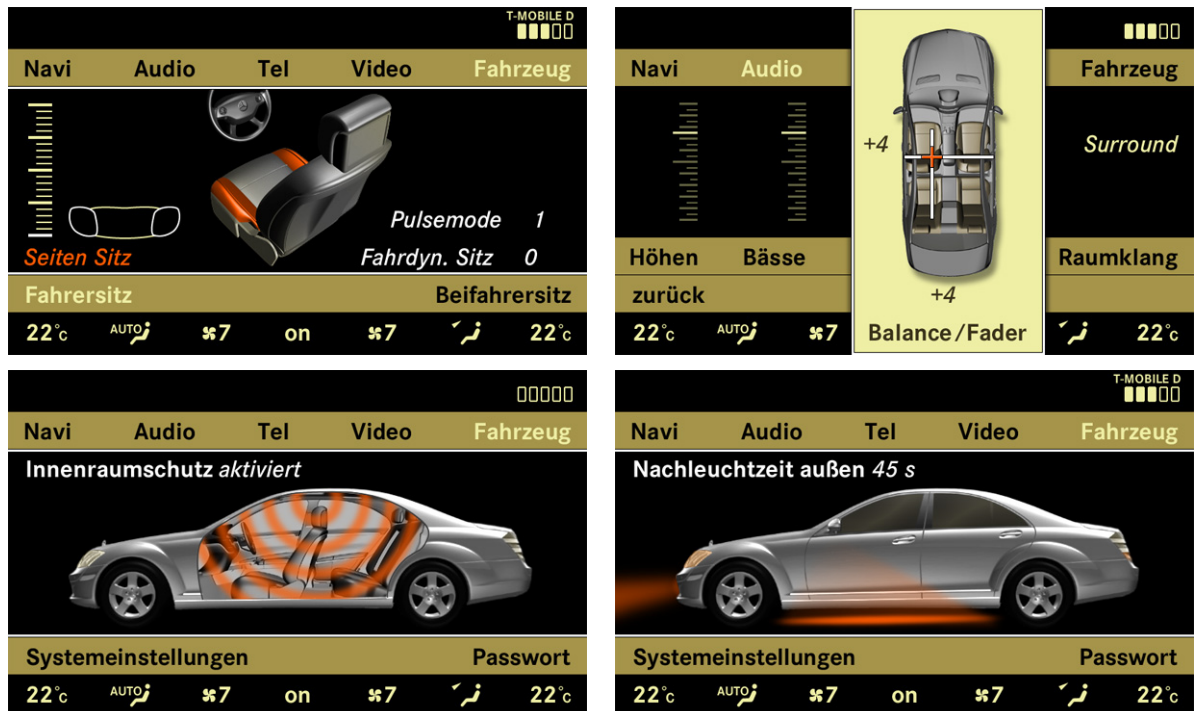
einer Größe von ca.  $8^\circ \times 4^\circ$  Sehwinkel in einem Abstand von ca. 2.5 m vor dem Fahrer. Einerseits kann die damit verbundene Separierung der im HUD dargestellten Informationen vom Fahrzeuginnenraum durchaus erwünscht sein, andererseits entsteht dadurch eine weitere Tiefenebene, auf welche die Aufmerksamkeit von Zeit zu Zeit zur Überwachung von Informationsveränderungen gerichtet werden muss (1. Außensicht, 2. Kombiinstrument, 3. zentrales Multifunktionsdisplay, 4. HUD). Eine Überlagerung oder räumliche Nähe von Informationen im HUD und in der Außensicht sichert keinesfalls, dass diese auch gleichzeitig wahrgenommen werden. So wurden in zwei überlagerten Videosequenzen selbst die auffälligsten Ereignisse nicht entdeckt, wenn sie in dem Video erschienen, welches gerade nicht beachtet wurde (*inattention blindness*: Neisser & Becklen, 1975; Simons & Chabris, 1999). Aus dem gleichen Grund wurden mit HUD in Flugsimulationsstudien unerwartete externe Informationen häufiger verpasst als mit Displays im Flugzeuginnenraum (Fisher, Haines & Price, 1980; Wickens & Long, 1995). Aufmerksamkeitswechsel fallen insbesondere dann schwer, wenn das gerade beachtete Objekt oder Ereignis die Aufmerksamkeit stark beansprucht (*cognitive capture*: Ambinder & Simons, 2005; Most, Scholl, Clifford & Simons, 2005). Wenn also ein HUD viele, schlecht erkennbare, häufig veränderliche, bewegliche und interessante Informationen enthält, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sicherheitskritische Situationen in der Realität übersehen werden (Übersicht in Fadden, Ververs & Wickens, 1998). Außerdem werden Informationen in der Außensicht verdeckt. Da heutige HUD lediglich 2D-Anzeigen in einer weiteren Tiefenebene erlauben und kontaktanaloge HUD noch nicht verfügbar sind, werden sie in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

**Fazit.** Die Tatsache, dass sich die Aufmerksamkeit in der Tiefe verlagern lässt, kann dazu verwendet werden, Informationen in Benutzungsoberflächen zu kodieren, hervorzuheben und zu separieren. Besonders effektiv wirken hierbei Kombinationen aus stereoskopischer Tiefe und Farbe. Gleichzeitig kann durch die Aufmerksamkeitsverlagerung in der Tiefe bei räumlich verteilten Informationen zusätzlicher Wahrnehmungsaufwand entstehen. HUD ermöglichen es, ausgewählte Informationen in einer Tiefenebene zu separieren. Solange die Informationen nicht kontaktanalog im Blickfeld des Fahrers an die räumliche Position in der realen Fahrzeugumgebung projiziert werden, auf die sie sich beziehen, sind eher Aufmerksamkeitsnachteile als -vorteile zu erwarten.

### 3.1.5 Bildhaftigkeit

Perspektivische 3D-Anzeigen ermöglichen bildhafte Darstellungen in graphischen Benutzungsoberflächen. Bildhaftigkeit (*concreteness*) bedeutet, dass gegenständliche Abbildungen von Objekten oder Szenen einen Sachverhalt repräsentieren. Diese können dabei entweder den realen Sachverhalt

wiedergeben oder Analogieschlüsse aufgrund des Vorwissens des Benutzers ermöglichen (*visuelle Metaphern*: vgl. McDougall, de Bruijn & Curry, 2000). Die Bedeutung und die Funktion bildhaft dargestellter Anzeigeninhalte sollten deshalb für die Benutzer unmittelbar verständlich sein, ohne dass weitere Hilfeinformationen, Instruktionen und Trainings erforderlich sind (vgl. Definition Intuitivität in Mohs, Hurtienne, Scholz & Rötting, 2006).



**Abbildung 3-2: Beispiele für bildhafte Anzeigen in Fahrzeugen**

Bildhafte Darstellungen zur Erläuterung der Bedeutung verschiedener Einstellungen in einer Mercedes-Benz S-Klasse (W221, 2005).

Ein unmittelbares Verständnis ist insbesondere dann wichtig, wenn Funktionen erstmalig oder selten benutzt werden und wenn während der Nutzung keine zusätzlichen Informationen (z.B. Bedienungsanleitungen) verfügbar sind oder beispielsweise bei gleichzeitiger Fahrt gar nicht aufgenommen werden können. Roscoe (1968) stellte das *principle of pictorial realism* auf und betonte damit, wie wichtig ein offensichtlicher Bezug zwischen graphischen Symbolen und dem repräsentierten Sachverhalt ist. Auch wenn Roscoe Analogien in der räumlichen Anordnung meinte, kann heute das Prinzip auf bildhafte Anzeigen erweitert werden. Bildhafte 3D-Darstellungen begegnen uns immer häufiger in Infotainment-Beiträgen in Fernsehen und Presse, in Lernsoftware, als technische Illustrationen in Bedienungsanleitungen und Produktinformationen, als Icons in graphischen Benutzungsoberflächen und als „graphische Erläuterungen“ von Funktionen, welche mit Hilfe von Begriffen nur schwer zu vermitteln sind (s. Abb. 3-2). Studien zur Gestaltung von Icons weisen eine höhere unmittelbare Verständlichkeit, eine bessere Widererkennungs- bzw. Erinnerungsleistung sowie eine stärkere subjektive Präferenz bildhaft

dargestellter Objekte im Vergleich zu abstrakten Symbolen nach (Kebeck, Cieler & Pohlmann, 1997; McDougall, Curry & de Bruijn, 1999; McDougall et al., 2000; Schramek, 2003). In Navigationsanzeigen wird ein Vorteil bildhafter Darstellungen von *landmarks* (z.B. auffällige Bauwerke, Ampeln, Brücken, Tunnel) dahingehend erwartet, dass sie das Wiedererkennen der eigenen Position in einer Karte einerseits und das Wiedererkennen des nächsten Abbiegepunktes in der Realität andererseits beschleunigen können. Untersuchungen mit tragbaren Navigationsgeräten liefern dazu erste Hinweise (Oulasvirta et al., 2005; Rakkolainen & Vainio, 2001; Vainio & Kotala, 2002).

Diese Ergebnisse zeigen aber auch, dass bildhafte Icons bereits mit Hilfe zweidimensionaler Darstellungen sehr gut umsetzbar sind. Welche zusätzlichen Vorteile bringen darüber hinaus 3D-Darstellungen? Eine Studie von Ark et al. (1998) zeigte, dass 3D-Abbildungen realer Objekte im Vergleich zu 2D-Icons in einer PC-Benutzeroberfläche schneller identifiziert wurden, weil sie noch besser verständlich als die in dieser Studie verwendeten 2D-Icons waren. Gleichzeitig existierten zahlreiche graphische Unterschiede zwischen den 2D- und 3D-Icons, die den Unterschied ebenfalls hervorgerufen haben können. Des Weiteren gibt es Anzeichen dafür, dass durch 3D-Darstellungen die Prozesse der Objektwahrnehmung unterstützt werden. Irani und Ware (2003) wiesen in Flussdiagrammen eine schnellere Objekterkennung und Erinnerungsleistung mit primitiven geometrischen 3D-Objekten (*3D-Geone*) als mit in Form, Farbe und Größe vergleichbaren 2D-Konturen der 3D-Objekte nach. Der einzige Unterschied bestand darin, dass die Oberflächen der 3D-Objekte mit Helligkeitsverläufen versehen waren. Liter und Kollegen (1998) schränkten ein, dass Helligkeitsverläufe an 3D-Objekten nur in ungünstigen Perspektiven den 2D-Konturen der 3D-Objekte in der Objekterkennung überlegen sind. Insgesamt ist aber davon auszugehen, dass die Oberflächeneigenschaften von 3D-Objekten wie Texturen, Helligkeitsverläufe und Schatten mehr Merkmale liefern, mit deren Hilfe Objekte wahrgenommen, erkannt und erinnert werden (Ark et al., 1998; Irani & Ware, 2003; Liter et al., 1998).

Bildhafte 3D-Szenen können verwendet werden, um in Benutzungsoberflächen realweltliche Metaphern abzubilden. Beispiele dafür sind reale Räume (*3DNA*: 3DNA Corp., 2004; *Win3D*: Clockwise Technologies Ltd., 2001), Galerien (*Task Gallery*: Robertson et al., 2000), Büros (*Web Forager*: Card, Robertson & York, 1996), Dokumentenstapel mit physikalischen Eigenschaften (*Bumptop*: Agarawala & Balakrishnan, 2006), Bücher (*3Book*: Card, Hong, Mackinlay & Chi, 2004; *WebBook*: Card et al., 1996) und der *Datamountain* (Robertson et al., 1998). Zum einen wird erwartet, dass realweltliche Metaphern es dem Benutzer erlauben, sein Wissen über vertraute Umgebungen, Objekte und Gesetzmäßigkeiten auf eine Benutzungsoberfläche zu

übertragen, sodass die Interaktionsprinzipien ohne zusätzlichen Lernaufwand unmittelbar verständlich sind (Agarawala & Balakrishnan, 2006; Liu, Pastoor, Seifert & Hurtienne, 2000; Preim, 1999). Zum anderen wird vermutet, dass realweltliche Metaphern den Rahmen für eine „ökologische“ Anordnung von Objekten (Ark et al., 1998; Colle & Reid, 2003; Robertson et al., 2000; Robertson et al., 1998; Tavanti & Lind, 2001) und für eine Nutzung von Elementen der Szene (z.B. Ecken, Wände, Texturen) als passive landmarks bieten (Agarawala & Balakrishnan, 2006; Darken & Sibert, 1996; Robertson et al., 1998). Dadurch aktivieren sie vermutlich das räumliche Gedächtnis.

Das räumliche Gedächtnis wirkt jedoch bereits zuverlässig in 2D-Benutzungsoberflächen als Basis der flächigen *Desktop-Metapher* und des Interaktionskonzeptes der *direkten Manipulation* (Ehret, 2002; Tan, Stefanucci, Proffitt & Pausch, 2001). Einfache Begrenzungen auf einer Fläche haben ähnliche Effekte wie die Aufteilung einer Szene in mehrere Räume (*Raumeffekt*: Colle & Reid, 2003; McNamara, 1986). Mit der räumlichen Anordnung von Icons auf der ansteigenden Ebene des *Datamountain* fanden sich keine speziellen 3D-Vorteile für das räumliche Gedächtnis, wenn die experimentelle Variation auf die Dimensionalität beschränkt war (Cockburn, 2004; Cockburn & McKenzie, 2001, 2002). Ark und Kollegen (1998) zeigten als Einzige, dass eine „ökologische“ Anordnung von Icons in einer räumlichen Büro & Schreibtisch-Metapher zu einem schnelleren Auffinden von Objekten führen kann als eine flächige Anordnung in Zeilen und Spalten. Insgesamt stehen jedoch überzeugende Nachweise der Vorteile von 3D-Benutzungsoberflächen mit realweltlichen Metaphern noch aus. Nicht einmal die voll funktionstüchtigen kommerziellen 3D-Desktops mit Raum-, Büro- und Schreibtischmetaphern wie *Win3D* oder *3DNA* fanden bei den PC-Anwendern bisher den erwarteten Anklang. Ein weiterer Nachteil der exakten Übernahme realweltlicher Metaphern liegt darin, dass auch die Probleme der Realität kopiert werden. Vor dem Hintergrund dieser Ergebnisse wird nicht erwartet, dass der Einsatz realweltlicher Metaphern die Gebrauchstauglichkeit abstrakter Interaktionskonzepte wie Menüauswahl, Listenauswahl und alphanumerische Eingabe spürbar verbessern könnte. Die erwähnten bildhaften 3D-Visualisierungen von Funktionen, die mit Begriffen und abstrakten Symbolen schwer zu beschreiben sind, sind als Ergänzungen abstrakter Interaktionskonzepte sinnvoll, ohne dass dadurch „richtige“ 3D-Benutzungsoberflächen entstehen.

Viele Autoren vermuten, dass bildhafte 3D-Anzeigen die Wahrnehmung, Informationsverarbeitung und Erinnerung deshalb erleichtern, weil sie besonders „natürlich“ und „ökologisch“ unsere reale Umwelt nachempfinden (z.B. Wickens et al., 1989). Unsere Gehirne hätten sich schließlich darauf

eingestellt, weil wir in einer dreidimensionalen Welt aufgewachsen sind und in ihr all unsere Erfahrungen gemacht haben (z.B. Ware, 2004). Diese Argumentation ist meist mit der Forderung nach einer Steigerung des Photorealismus verbunden, obwohl bisher kein objektiver Leistungsvorteil photorealistischer 3D-Anzeigen nachgewiesen wurde (vgl. Smallman & St. John, 2005). Im Gegenteil, es sollte nur so viel Photorealismus wie nötig in bildhaften 3D-Objekten und Szenen umgesetzt werden – und das nicht nur aus Gründen des technischen Aufwands. Wenn beispielsweise bei der Icon-Gestaltung so weit gegangen wird, dass in der Realität sehr ähnliche Objekte (z.B. verschiedene Typen von Flugzeugen oder Schiffen) durch miniaturisierte Icons repräsentiert werden, die den tatsächlichen 3D-Daten-Modellen dieser Objekte genau entsprechen, und die Aufgabe darin besteht, wenige zuvor gelernte Icons zu benennen oder anhand bestimmter Kriterien in größeren Mengen von Icons zu suchen, ist es nicht verwunderlich, wenn in diesem Fall abstrakte 2D-Symbole überlegen sind (Smallman, St. John & Oonk, 2001; Smallman, St. John, Oonk & Cowen, 2000). Auch für bildhafte 2D- oder 3D-Icons gilt, dass diese gut unterscheidbar sein müssen und dass alle Informationen deutlich erkennbar sind, die für die Ausführung einer Aufgabe wichtig sind. Smallman und Kollegen (Smallman, St. John, Oonk & Cowen, 2001) demonstrieren, wie ein sinnvoller Kompromiss bildhafter und abstrakter Elemente für deren Anwendung aussehen kann.

Nicht-photorealistische bildhafte 3D-Darstellungen bieten zudem Gestaltungsfreiräume, um besser als die Realität zu sein (vgl. Bowman et al., 2004; Shneiderman, 2003). Markierungen, Hervorhebungen und Ausblendungen helfen, wichtige Informationen herauszustellen (z.B. Meng, 2002). Visualisierungsstile (z.B. skizzenhaft, cartoonartig) lösen Emotionen und Handlungstendenzen aus (z.B. Halper, Mellin, Herrmann, Linneweber & Strothotte, 2003) und geben einer Anzeige einen individuellen „Charakter“. Die Auswahl geeigneter Tiefenkriterien und Perspektiven, gezielte Veränderungen der geometrischen Parameter einer Szene und die Verwendung visueller Hilfsmittel gleichen Nachteile von 3D-Anzeigen aus (vgl. Kap. 5). Der Verzicht auf Objekte und Details, die für eine Aufgabe nicht benötigt werden, reduziert die visuelle Komplexität. Diese Freiräume sollten bei der Gestaltung bildhafter 3D-Anzeigen auf jeden Fall genutzt werden.

Bildhafte 3D-Anzeigen müssen nicht zwangsläufig visuell komplex sein. Unter *visueller Komplexität* wird gewöhnlich verstanden, wie viele graphische Elemente eine Anzeige oder ein Icon enthält (z.B. Garcia, Badre & Stasko, 1994; McDougall et al., 2000; Tullis, 1983). Möglicherweise senkt eine höhere Bildhaftigkeit die visuelle Komplexität sogar dadurch, dass einzelne graphische Elemente eher als einheitliche Objekte wahrgenommen und verarbeitet

werden (*objektbasierte Wahrnehmung*: Atchley & Kramer, 2001; Duncan, 1984). In den meisten Studien wurden Bildhaftigkeit und visuelle Komplexität konfundiert verwendet, d.h. bildhafte Anzeigen waren gleichzeitig visuell komplex (z.B. Garcia et al., 1994; Übersichten in McDougall et al., 1999; McDougall et al., 2000). McDougall und Kollegen (1999, 2000) wiesen jedoch die Unabhängigkeit der beiden Variablen nach. Da eine höhere visuelle Komplexität mit längeren Suchzeiten verbunden ist (z.B. Mazur & Reising, 1990; McDougall et al., 2000; McDougall, Tyrer & Folkard, 2006) und deshalb auch die Ablenkungswirkung während der Fahrt zunehmen kann (z.B. Evans & Stevens, 1997; Theofanou, 2002), sollten bildhafte 3D-Anzeigen in Fahrzeugen so visuell einfach wie möglich gestaltet und deren Ablenkungswirkung im Einzelfall überprüft werden.

Es gibt aber auch Anwendungen, in denen bildhafter Photorealismus (egal wie visuell komplex) nicht schadet, sondern sogar erforderlich ist, um das Präsenzerleben zu intensivieren (Barfield, Zeltzer et al., 1995; Schuemie et al., 2001). Dazu gehören Simulationen und virtuelle Umgebungen, die zu Trainings-, Bildungs- und Unterhaltungszwecken sowie in der Psychotherapie eingesetzt werden. Auch wenn Lern- und Trainingsaufgaben nicht zwangsläufig besser bearbeitet werden, wenn das Präsenzerleben stärker ist, (Übersicht in Schuemie et al., 2001), so steigt doch unbestritten die Attraktivität dieser Anwendungen (Andre & Wickens, 1995; Smallman & St. John, 2005). Präsenzerleben und Attraktivität stellen z.B. in Computerspielen und in virtuellen Rundgängen in Museen sogar das vorrangige Ziel der Anwendungen dar. Und auch in virtuellen Umgebungen für psychotherapeutische Zwecke geht es um das Präsenzerleben an sich (Riva, 2005).

**Fazit.** 2D- und 3D-Anzeigen bieten die Möglichkeit, einen Sachverhalt durch gegenständliche Abbildungen von Objekten und Szenen bildhaft zu repräsentieren und dadurch das unmittelbare Verständnis zu erhöhen. Der darüber hinausgehende Nutzen bildhafter 3D-Anzeigen wird erstens darin gesehen, dass die Freiheitsgrade der Umsetzung gegenständlicher Abbildungen vielfältiger sind als in 2D-Anzeigen. Zweitens gibt es Belege dafür, dass die Oberflächeneigenschaften von 3D-Objekten wie Texturen, Helligkeitsverläufe und Schatten zusätzliche Merkmale liefern, mit deren Hilfe Objekte wahrgenommen, erkannt und erinnert werden. Drittens könnten bildhafte 3D-Darstellungen den Abgleich von Realität und Anzeige erleichtern. Der Einsatz realweltlicher Metaphern bei der Umsetzung abstrakter Interaktionskonzepte wird entsprechend der Ergebnisse der verfügbaren Studien nicht als sinnvoll angesehen. Ebenso wenig müssen 3D-Anzeigen zwingend photorealistisch umgesetzt werden. Im Gegenteil, nicht-photorealistische 3D-Darstellungen bieten Gestaltungsfreiräume, um besser als die Realität zu

sein. Ungeachtet dessen gibt es dennoch Anwendungen wie z.B. Computerspiele und Simulationen, die den Photorealismus benötigen, um gezielt das Präsenzerleben der Anwender zu steigern. Wichtig ist, dass Bildhaftigkeit und visuelle Komplexität voneinander unabhängig sind, so dass bildhafte 3D-Anzeigen mit vertretbarer visueller Komplexität umgesetzt werden sollten.

### **3.1.6 Attraktivität**

Die technische Entwicklung von Displays vollzieht sich von niedrig auflösenden monochromen Displays über hoch auflösende Farbdisplays bis hin zu autostereoskopischen 3D-Displays, die einen intensiven plastischen Tiefeneindruck erzeugen, ohne dass dafür eine zusätzliche Brille benötigt wird. Kaum ein Fernsehzuschauer oder Nutzer von PC's und Mobiltelefonen würde freiwillig den Wechsel von Schwarz-Weiß- auf Farbbildschirme rückgängig machen wollen. Selbst Norman (2004b), der aus ergonomischer Sicht keine zwingenden Gründe für die Verwendung von farbigen PC-Monitoren finden konnte (außer für die Hervorhebung von Informationen), wollte den farbigen PC-Monitor, mit dem er die Untersuchungen durchführte, nur sehr ungern zurückgeben. Auch 3D-Anzeigen sind bei den Nutzern äußerst beliebt, insbesondere photorealistische (z.B. Agarawala & Balakrishnan, 2006) und stereoskopische (Hutarew, Moser & Dietze, 2004; McWorther et al., 1991; Steiner & Dotson, 1990). Eine Erklärung dafür wäre, dass 3D-Anzeigen ein weiterer Schritt hin zu einer Annäherung der Darstellungsqualität von Displays an die menschliche Wahrnehmung in der realen Umwelt sind. Beispielhaft seien hierzu Wickens und Kollegen (1989) zitiert: „There is little doubt that 3D renderings, if carefully constructed, can provide a ‘natural’ viewing of a variety of environments, which is aesthetically pleasing” (S.109). Einige Autoren behaupten, dass diese „Natürlichkeit“ von 3D-Anzeigen nicht nur zu Gefallen und Begeisterung führt, sondern objektive Verbesserungen in der Wahrnehmung, Informationsverarbeitung und Erinnerung bewirken (s. Abschn. 3.1.5).

3D-Anzeigen werden selbst dann bevorzugt, wenn sie die Leistung objektiv überhaupt nicht verbessern (z.B. Carswell, Frankenberger & Bernhard, 1991; Cockburn & McKenzie, 2001; Lamping et al., 1995; Pirollo et al., 2000) oder - noch bemerkenswerter – sich die Leistung sogar verschlechtert (Hicks et al., 2003; Smallman et al., 2000; Steiner & Dotson, 1990). Dass nicht unbedingt die Benutzungsoberflächen präferiert werden, welche zu besseren Leistungen führen, ist nicht auf 3D-Anzeigen beschränkt (Übersicht in Andre & Wickens, 1995). Bei deren Gestaltung sollten immer Präferenz und Leistung optimiert werden. Zum einen werden Konsumgüter nur gekauft, wenn sie den Kunden gefallen. Zum anderen sind Kunden sehr schnell unzufrieden, wenn ein Produkt nicht funktioniert oder nicht leicht zu bedienen ist. Es führt kein Weg daran vorbei, gleichzeitig die Funktionalität, Gebrauchstauglichkeit und



Attraktivität der Produkte zu optimieren (Jordan, 2000; Norman, 2004b). Erst vor einigen Jahren rückte die Attraktivität von Benutzungsschnittstellen ins Interesse der *Human Factors* Experten. Seitdem werden unter Stichwörtern wie „Freude am Bedienen“, „hedonistische Qualität“, „Funology“ und „User Experience“ Vorschläge dazu unterbreitet, wie funktionale, gebrauchstaugliche und attraktive Interfaces gestaltet und evaluiert werden (Übersichten in Blythe, Overbeeke, Monk & Wright, 2004; Hassenzahl, 2006; Hassenzahl & Tractinsky, 2006; Helander & Tham, 2003; Norman, 2004a). 3D-Anzeigen haben das Potenzial, diesen Anforderungen gerecht zu werden.

Nachwievor liest und hört man jedoch in Bezug auf 3D-Anzeigen Kommentare, die gegen deren Verwendung in Fahrzeugen sprechen: 3D-Anzeigen erhöhen die visuelle Komplexität (z.B. Shneiderman, 2003); 3D-Anzeigen ziehen viel Aufmerksamkeit auf sich (vgl. Liu et al., 1997; Olmos et al., 2000); maximaler Photorealismus ist nicht sinnvoll (z.B. Smallman & St. John, 2005). Neben aller Kritik sollte die positive Wirkung von attraktiven 3D-Anzeigen nicht unterschätzt werden. Begeisterung und positive Emotionen „verführen“ einen potenziellen Benutzer überhaupt erst dazu, sich mit einem System zu befassen und bei anfänglich auftretenden Schwierigkeiten nicht sofort aufzugeben (vgl. Norman, 2004b). Dadurch wird indirekt der Aufbau von Fertigkeiten im Umgang mit dem System und von Wissen über Funktionen und Inhalte gefördert. Carswell et al. (1991) und Levy et al. (1996) erwähnen diesen Effekt attraktiver 3D-Anzeigen im Zusammenhang mit der Verwendung von „dekorativer Tiefe“ (*decorative depth*) in 2D-Daten-Diagrammen. Meng (2003) betont, wie wichtig die Attraktivität von Karten für die Nutzung von Geodiensten ist und sieht hier ein Potenzial von 3D-Visualisierungen.

Ein Anwendungsfall von 3D-Anzeigen, die keinen objektiven Nutzen bezwecken, aber potenziell die Attraktivität erhöhen, sind die erwähnten Diagramme mit dekorativer Tiefe. Zweidimensionale Daten werden hier durch 3D-Effekte als ästhetisches Beiwerk ohne jeden informativen Wert angereichert. Solche Diagramme sind nicht nur in den Fernsehnachrichten und in Hochglanzjournalen sehr verbreitet, sondern auch in seriösen Wirtschaftsberichten und wissenschaftlichen Studien. Bereits Tufte (1983) äußerte die Bedenken, dass bei einem Verhältnis von wenigen Informationen zu vielen graphischen Details mit Leistungseinbußen beim Lesen von Diagrammen zu rechnen ist. Gillan & Richmann (1994) wiesen dies empirisch nach und betonten die Überflüssigkeit von Hintergrundbildern in Diagrammen. Der negative Einfluss von 3D-Beiwerk in 2D-Diagrammen zeigte sich jedoch nicht so eindeutig wie vermutet (Carswell et al., 1991; Levy et al., 1996; Siegrist, 1996; Spence, 1990). Die Ergebnisse hingen überwiegend von der konkreten Gestaltung der 3D-Diagramme ab (z.B. Anzahl, Position und Höhe der Balken, Perspektive

und graphische Umsetzung des 3D-Effektes) (Siegrist, 1996; Wickens et al., 1989). Die positive Wirkung der 3D-Effekte auf die subjektive Bewertung der dargestellten Inhalte war hingegen überzeugend. Carswell und Kollegen (1991) zeigten, dass eine Universität moderner und distinktiver erschien, wenn sie mit 3D-Diagrammen anstelle von inhaltlich identischen 2D-Diagrammen beworben wurde. Psychologiestudenten bevorzugten 3D-Diagramme für Präsentationen und ein besseres Erinnern an Daten (Levy et al., 1996).

**Fazit.** 3D-Anzeigen werden als besonders ästhetisch und natürlich erlebt. Sie wirken visuell anziehend auf den Betrachter (Attraktivität) und werden deshalb meist im Vergleich zu 2D-Anzeigen bevorzugt (Akzeptanz). Für die Anwendung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen führt dies zu folgender Überlegung: Selbst wenn sich keine objektiven Vorteile von 3D-Anzeigen zeigen sollten, aber im Gegenzug auch keine Nachteile für die Wahrnehmungssicherheit und Ablenkungswirkung gefunden werden, ist deren Einsatz allein wegen ihrer potenziell die Attraktivität und Akzeptanz steigernden Wirkung gerechtfertigt.

### 3.2 Nachteile von 3D-Anzeigen

Neben den Vorteilen, die im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigt wurden, klangen bereits an einigen Stellen mögliche Nachteile von 3D-Anzeigen an. Diese kommen vor allem dann zum Tragen, wenn den besonderen Anforderungen an die Gestaltung von 3D-Anzeigen nicht Rechnung getragen wird. Im Folgenden werden die wesentlichen Nachteile von 3D-Anzeigen aufgeführt.

**Präzise räumliche Urteile** über Positionen, Distanzen und Winkel sowie die Bestimmung der Größe von Objekten sind durch die Mehrdeutigkeit von 3D-Anzeigen generell erschwert, vor allem aber entlang der Sichtlinie (McGreevy & Ellis, 1986; Smallman, St. John & Cowen, 2002; Wickens et al., 1989). So kann ein Objekt, welches in einer Anzeige höher als ein anderes abgebildet ist, weiter entfernt, höher oder beides sein. Die Mehrdeutigkeit entsteht dadurch, dass bei der Projektion einer 3D-Szene auf eine Bildebene (z.B. Retina, Bildschirm, Photo, Gemälde) die Informationen der drei Dimensionen komprimiert bzw. perspektivisch verkürzt werden. So gehen zwar in 3D-Anzeigen keine Informationen über eine Dimension gänzlich verloren, aber es entstehen systematische Wahrnehmungsfehler (Beispiele in McGreevy & Ellis, 1986; Smallman, Manes & Cowen, 2003; Smallman et al., 2002; Tittle, Woods, Roesler, Howard & Phillips, 2001; Wickens et al., 1989). Je nach Höhenwinkel sind davon die Tiefen- oder Höhenurteile stärker betroffen (s. Abschn. 5.6). Bei flachen Höhenwinkeln wie der Fahrerperspektive fallen Tiefenurteile schwer (Barfield & Rosenberg, 1995; Smallman et al., 2002; Yeh & Silverstein, 1992) und wesentliche 3D-Objektmerkmale werden langsamer oder gar nicht erkannt (Green & Williams, 1992; Heller et al.,

2003). Die konkrete Auswahl der Gestaltungsparameter einer 3D-Anzeige beeinflusst die Ausprägung der systematischen räumlichen Wahrnehmungsfehler und kann diese unter Umständen vollständig aufheben (vgl. Kap. 5).

Wenn die Aufgabe eine **Fokussierung der Aufmerksamkeit** auf nur eine Dimension erfordert (z.B. Ablesen eines Wertes auf einer Achse eines Koordinatensystems), erweist sich die Integration von Informationen in 3D-Anzeigen als nachteilig (Haskell & Wickens, 1993; Wickens & Carswell, 1995). Durch gleichzeitige Veränderungen in den anderen Dimensionen wird dieser Effekt verstärkt. Mit optimal gestalteten 3D-Anzeigen kann es sein, dass dieser Nachteil nur unter bestimmten Bedingungen (Hollands et al., 1998) bzw. überhaupt nicht (Wickens et al., 1994) auftritt.

Die **Ablenkungswirkung** kann sich bei der Verwendung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen potenziell erhöhen und muss deshalb im Einzelfall untersucht werden. Visuell komplexe 3D-Anzeigen verlängern die Suchzeiten (z.B. Mazur & Reising, 1990; McDougall et al., 2000; McDougall et al., 2006). Photorealistische, animierte und egozentrische 3D-Anzeigen ziehen die Aufmerksamkeit des Betrachters vermutlich besonders auf sich (vgl. Liu et al., 1997; Olmos et al., 2000). Die zuvor berichteten Nachteile integrierter Anzeigen bei der Ausführung von Aufgaben, die eine Fokussierung der Aufmerksamkeit erfordern, können ebenfalls zu einer Erhöhung der Ablenkungswirkung führen.

**Orientierungsprobleme** („*getting lost in space*“) sind in großen Netzwerken und Datenbanken ohne hierarchische Struktur und in ausgedehnten virtuellen Umgebungen nicht selten (Bowman et al., 2004; Liu et al., 2000; Shneiderman & Plaisant, 2005). Wenn nicht das gesamte System in einer Anzeige sichtbar ist und keine Übersichtsdarstellungen verfügbar sind, kommt dieser Nachteil besonders zum Tragen.

Eine **freie und kontinuierliche Navigation im Raum** mit drei bis sechs Freiheitsgraden ist manuell und kognitiv beanspruchender als eine Beschränkung der Navigation auf ein oder zwei Freiheitsgrade in der Fläche, die zudem in diskreten Schritten bzw. mit anderen Führungshilfen erfolgt (vgl. Bowman et al., 2004; Shneiderman & Plaisant, 2005).

Da die wenigsten Menschen **Erfahrungen im Umgang mit 3D-Anwendungen** haben, darf die Interaktion nicht dadurch überfrachtet werden, dass Perspektiven, Interaktionsstile, Anzeigemodi und Bedienoptionen von den Nutzern konfiguriert werden müssen.

Der **Gestaltungsaufwand** von 3D-Anzeigen ist höher als der von 2D-Anzeigen. Es müssen die Art und Anzahl der Tiefenkriterien, die technische Umsetzung der stereoskopischen Disparität (falls diese eingesetzt wird), der Bezugsrahmen, die Perspektive, geometrische Parameter der virtuellen

Szene und visuelle Hilfsmittel so ausgewählt werden, dass keine systematischen Wahrnehmungsfehler entstehen. Darüber hinaus gibt es bisher keine standardisierten Entwicklungsumgebungen und Interaktionselemente.

3D-Anzeigen benötigen **leistungsfähige Hard- und Software**. Das betrifft die Leistungsfähigkeit des Prozessors und der Grafikkarte, deren Speicherkapazitäten und die speziellen Effekte der 3D-Modellierungs- und Anzeigeprogramme. Stereoskopische Anzeigen und einzelne 3D-Bedienelemente erfordern zusätzliche Hardware.

**Fazit.** Die Nachteile von 3D-Anzeigen können deren Vorteile vollkommen kompensieren, wie z.B. im Falle der präzisen räumlichen Urteile und der Aufgaben mit fokussierter Aufmerksamkeit. Die sorgfältige Gestaltung von 3D-Anzeigen ist insbesondere deswegen von Bedeutung, weil sich dadurch einige der 3D-Nachteile vermeiden lassen. Der Aufwand für die Gestaltung und Umsetzung von 3D-Anzeigen mit leistungsfähiger Hard- und Software ist in Betracht zu ziehen, wenn es um ein ausgewogenes Verhältnis des Nutzens und der Kosten geht. Da nicht alle Nachteile auf alle 3D-Anzeigen und Anwendungsgebiete zutreffen, ist im Einzelfall stets zu prüfen, ob ein Nachteil zu beachten ist oder nicht.

## 4 Anwendungsmöglichkeiten von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen

Vorteile von 3D-Anzeigen sind zu erwarten, wenn bei der Ausführung von Aufgaben räumliche Informationen integriert verarbeitet werden. Der Pilot eines Kampffliegers, der sich im freien Flug befindet und dabei anderen Kampffliegern und Objekten in der Landschaft in allen drei Dimensionen ausweicht, hat eine solche Aufgabe. Unter schlechten Sichtbedingungen (z.B. Nacht, Wolken, Nebel) sind Piloten darauf angewiesen, alle Umweltinformationen auf den Instrumenten des Flugzeugs angezeigt zu bekommen.

In Fahrzeugen nehmen die Fahrer zwar Informationen über die räumliche Fahrzeugumgebung auf, aber da sich die Eingaben des Fahrers auf die Quer- und Längsregelung beschränken, sind überwiegend zweidimensionale horizontale Informationen zu verarbeiten. Höheninformationen kommen nur in speziellen Situationen zum Tragen. Dazu gehören beispielsweise die Navigation und Orientierung in bergigem Gelände, Abbiegeentscheidungen an Kreuzungen mit auf- und abwärts führenden Straßen sowie an Autobahnkreuzen und Schnellstraßen mit über-/untereinander verlaufenden Spuren, das Einparken in Parklücken mit hineinragenden Objekten, das An- und Entkoppeln von Zusatzgeräten (z.B. Schneepflug, Rasenmäher) an Nutzfahrzeuge und das Hantieren mit diesen Zusatzgeräten.

3D-Anzeigen könnten aber auch dazu verwendet werden, zweidimensionale Informationen der Breite und Tiefe kompatibel aus dem Blickwinkel des Fahrers darzustellen. Da der Fahrer aber - anders als der Pilot – letztlich alle wesentlichen zur Fahrzeugführung erforderlichen Informationen mit Hilfe von Blicken durch die Scheiben oder in die Spiegel aufnehmen kann, sind 3D-Anzeigen der Fahrzeugumgebung selbst in den oben genannten Situationen nicht zwingend erforderlich. Außer es fehlen dem Fahrer Informationen in trotz Scheiben und Spiegeln schlecht einsehbaren Bereichen des Fahrzeugs (z.B. Anhängerkupplung, Stoßstangen), bei starkem Nebel oder bei einer Nachtfahrt mit Abblendlicht und Gegenverkehr auf einer unbeleuchteten Straße. Wenn man beabsichtigen würde, aus Gründen der passiven Sicherheit, die Scheiben des Fahrzeugs vollkommen durch Displays zu ersetzen, bekämen 3D-Anzeigen eine ganz andere Bedeutung. Dieser hypothetische Anwendungsfall von 3D-Anzeigen ist jedoch der Zeit um einiges voraus.

Das Potenzial von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen liegt somit nicht in der Unterstützung der primären, sondern der sekundären Aufgaben des Fahrers. Anzeigen von Fahrerassistenz- und Informationssystemen sowie von Funktionen auf Multifunktionsdisplays bieten sinnvolle Anwendungsmöglichkeiten. Worin diese im Einzelnen bestehen, wird in vier Schritten untersucht.

Zuerst wird in Abschnitt 4.1 eine Übersicht der primären und sekundären Aufgaben des Fahrers gegeben. Diesbezüglich wird eine Bewertung vorgenommen, welche Herausforderungen mit heutigen Anzeige- und Bedienkonzepten zu bewältigen sind. In einem zweiten Schritt werden die in Kapitel 3 berichteten Vor- und Nachteile von 3D-Anzeigen zu einem Fragenkatalog zusammengestellt, der in der Aufgabenanalyse Anwendung findet (s. Abschn. 4.4). Anhand dieses Fragenkatalogs werden zunächst allgemeine Antworten in Bezug auf den Einsatz von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen gegeben. In einem dritten Schritt wird in Abschnitt 4.3 ein Aufgabe des Fahrers ausgewählt, anhand derer die Aufgabenanalyse, die Gestaltung und die Bewertung von 3D-Anzeigen in dieser Arbeit beispielhaft vorgenommen wird. In Abschnitt 4.4 werden im letzten Schritt die Beispielaufgabe in Teilaufgaben zerlegt und zur Ausführung der Teilaufgaben erforderliche Informationen und Handlungen herausgearbeitet. Diese Teilaufgaben werden dem Fragenkatalog der Vor- und Nachteile von 3D-Anzeigen gegenübergestellt, sodass Hypothesen über die Wirkung von 3D-Anzeigen für den konkreten Anwendungsfall aufgestellt werden können. Dieses Vorgehen kann auf alle Aufgaben übertragen werden, bei denen abgeschätzt werden soll, ob 3D-Anzeigen einen Vorteil erbringen.

## 4.1 Aufgaben des Fahrers

Die *Primäraufgabe* des Fahrers besteht darin, das Fahrzeug zu führen, d.h. zu lenken, zu beschleunigen und zu verzögern. Es besteht Einigkeit darüber, die Fahrzeugführung entsprechend der hierarchischen Modelle der Informationsverarbeitung (vgl. Hacker, 1999; Rasmussen, 1983) in drei Ebenen zu untergliedern, die verschiedene kognitive Anforderungen an den Fahrer stellen. Das Planen (z.B. Route planen, Fahrziel, -zeit und -stil festlegen) erfordert kontrollierte und bewusste Informationsverarbeitungsprozesse, in denen vorhandenes Wissen angewendet und Problemlösungen gesucht werden. Beim Manövrieren (z.B. Route verfolgen, Überholen, Spur wechseln, Abbiegen, Vorfahrt und Ampeln beachten) werden diejenigen Bedingungen bewusst identifiziert, unter denen bekannte Regeln ihren Einsatz finden können. Je häufiger vergleichbare Situationen eintreten, desto automatisierter läuft die Regelanwendung ab. Das Stabilisieren (z.B. Spur, Abstand und Geschwindigkeit halten, Lenken, Anfahren, Anhalten) erfolgt automatisiert und parallel zu anderen Verarbeitungsprozessen, da auf gelernte Fertigkeiten zurückgegriffen wird. Hierbei werden motorische Handlungen durch in der Umwelt wahrgenommene Signale ausgelöst.

Neben der Fahrzeugführung bearbeitet ein Fahrer *Sekundäraufgaben*, die in unterschiedlichem Ausmaß mit der Primäraufgabe zusammenhängen:

1. **Aufgaben mit Bezug zur Fahraufgabe.** Dazu gehören seit Anbeginn des Autofahrens Bedienaufgaben wie die Betätigung von Zündung, Blinker, Gangwahlhebel, Parkbremse, Fahrlicht und Scheibenwischern oder die Einstellung der Spiegel sowie Wahrnehmungsaufgaben wie das Ablesen der Instrumente (z.B. Geschwindigkeit) und Warnmeldungen. Zudem finden immer mehr Fahrerassistenz- und Informationssysteme Verwendung, die neben einer Erhöhung der Fahrsicherheit und einer Entlastung des Fahrers neue Bedien- und Wahrnehmungsaufgaben während der Fahrt generieren. Fahrerassistenzsysteme unterstützen den Fahrer, indem sie erstens selbsttätig in die Regelung eingreifen (z.B. ABS, ESP, Bremsassistent), zweitens Teile der Fahraufgabe auf Wunsch des Fahrers übernehmen (z.B. Abstandsregeltempomat, Parkassistent) oder drittens vor kritischen Situationen warnen (z.B. Einparkhilfe, Spurhalte-, Totwinkel- und Müdigkeitsassistent). Fahrerinformationssysteme greifen nicht in die Regelung ein und überlassen dem Fahrer die Interpretation der fahrbezogenen Informationen, die sie auf dessen Wunsch hin anbieten. Beispiele dafür sind Navigationssystem, Nachtsichthilfe, Rückfahrkamera, Bordcomputer mit Informationen zur Auswertung einer Fahrt (z.B. Fahrzeit, Entfernung, durchschnittliche Geschwindigkeit und Verbrauch) sowie Informationen von Verkehrs-, Wetter- und ähnlichen Informationsdiensten.
2. **Aufgaben mit Bezug zum Fahrzeug.** Die Zahl der Einstellmöglichkeiten am Fahrzeug steigt kontinuierlich aufgrund des zunehmenden Umfangs an Komfort- und Sicherheitsfunktionen. Dazu gehören - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - Einstellungen an Multikontursitzen mit einzeln ansteuerbaren Polstern, Lenkrad, Klimaanlage, Fenstern, Schiebedach, Rollos, einzelnen Innenleuchten, des ambienten Innenraumlichts und spezielle Fahrzeugeinstellungen (z.B. Nachleuchtzeit nach Verlassen des Fahrzeugs, Einstieghilfe, Innenraumüberwachung und Abschleppschutz).
3. **Aufgaben ohne Bezug zu Fahraufgabe oder Fahrzeug.** Dazu gehören die Bedienung von Unterhaltungs- und Kommunikationsfunktionen. Das klassische Autoradio wird immer mehr durch Multimediasysteme mit perfektem Raumklang, digitalem Empfänger, CD/DVD-Wechsler, digitalem Musikserver auf der Festplatte und Schnittstellen für digitale Speichermedien und portable Geräte abgelöst. Für eine Nutzung im Stand oder durch Beifahrer- und Fondpassagiere sind Fernsehen, Video, Schnittstellen für Spielekonsolen und digitale Fotoalben integriert. Darüber hinaus ist auf Kommunikationsfunktionen wie Telefon, SMS und E-Mail aus dem Fahrzeug kaum noch zu verzichten.

Bei der Bewältigung der mit der steigenden Anzahl an Funktionen einhergehenden Bedien- und Wahrnehmungsaufgaben lassen sich im Wesentlichen

zwei Herausforderungen beobachten, vor denen heutige Autofahrer stehen. Zum einen müssen sie sich daran gewöhnen, die Fahraufgabe stärker an Assistenzsysteme abzugeben. Es gilt deren Funktionsweise, Grenzen, Bedienung, Anzeigen und Warnungen für jedes einzelne System und für deren Zusammenwirken zu verstehen sowie angemessen in Warn- und Übernahme-situationen zu reagieren. Zum anderen müssen sich die Fahrer vom gewohnten Interaktionskonzept „eine Funktion = ein Schalter“ verabschieden und die Bedienung umfangreicher Menüsysteme erlernen. In dieser Arbeit wird hinterfragt, inwieweit 3D-Anzeigen einen Beitrag dazu leisten können, diesen beiden Herausforderungen Rechnung zu tragen.

## **4.2 Fragenkatalog zu den Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen**

In diesem Abschnitt wird ein Fragenkatalog vorgestellt, der zur Ableitung sinnvoller Anwendungsmöglichkeiten von 3D-Anzeigen herangezogen werden kann. Mit Hilfe dieser Fragen können der Nutzen und die Grenzen von 3D-Anzeigen für eine konkrete Anwendung abgeschätzt werden. Hier werden zunächst allgemeine Antworten in Bezug auf den Einsatz von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen gegeben, die ein breites Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten aufzeigen. In Abschnitt 4.4 wird der Fragenkatalog bei einer Aufgabenanalyse zur Verwendung von 3D-Anzeigen mit einer Beispielaufgabe angewendet.



**Tabelle 4-1: Fragenkatalog zu den Vorteilen von 3D-Anzeigen**

Vorteil	Allgemeine Fragen	Anwendung auf Fahrzeug
Integration	1) Werden dreidimensionale Informationen integriert verarbeitet? 2) Ist entweder ein räumliches Verständnis oder sind räumliche Bedienhandlungen gefordert?	Primäraufgabe ist Quer- und Längsregelung, d.h. Verarbeitung horizontaler 2D-Infos. Integration von 3D-Infos nur in speziellen Situationen: <i>Räumliches Verständnis</i> z.B. bei Navigation in bergigem Gelände, Einparken bei in Parklücke hineinragenden Objekten.  Sekundäraufgaben mit Integration: - <i>Räumliche Bedienhandlungen</i> (z.B. Sitz, Klang, Licht, Klima, Koppeln von und Hantieren mit Zusatzgeräten) - <i>Räumliches Verständnis</i> (z.B. Verortung von Warn- und Wartungsinfos, Fahrdatenauswertungen mit drei und mehr Variablen).
	<b>Vis. von Relationen</b> : Entfällt, da hier keine empirischen Belege eines Nutzens von 3D	
Räumliche Kompatibilität	1) Erfordert die Aufgabe einen Abgleich der Informationen innerhalb eines egozentrischen Bezugsrahmens? 2) Ist ein Abgleich zwischen Realität und Anzeige, Bedienung und Anzeige, Realität und Bedienung, mehreren Anzeigen oder mehreren Bedienungen gefordert?	<i>Abgleich Realität – Anzeige</i> : Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen (z.B. ART, Einparkhilfe, Nachtsichthilfe), Anzeigen des Navigationssystems (Karte, Pfeile), Anzeigen von räumlich verorteten Warn- und Wartungsinformationen
		<i>Abgleich Bedienung – Anzeige</i> : Räuml. Einstell. wie z.B. Sitz, Klang, Licht, Klima
		<i>Abgleich Realität – Bedienung</i> : Koppeln von und Hantieren mit Zusatzgeräten
Aufmerksamkeitslenkung	Kann die Tiefe sinnvoll für eine Hervorhebung, Kodierung oder Separierung von Informationen eingesetzt werden?	Tiefe zur Hervorhebung von Warn- und Fehlermeldungen, ausgewählten Menüpunkten und Listeneinträgen.
		Head-up Displays zur Separierung von Infos. Andernfalls Aufmerksamkeitsvorteile nur bei kontaktanaloger Integration der Info an jeweiliger Position in Realität.
Bildhaftigkeit	Verbesserung des unmittelbaren Verständnisses der dargestellten Informationen?	Bildhafte 3D-Anzeigen für mit Begriffen und abstrakten Symbolen schwer zu erklärende Funktionen, wie z.B. FAS, komplexe Komfortfunktionen (z.B. Sitze), Fahrzeugeinst. (z.B. Einstiegshilfe), POI's in Navi-Karte, Hybridantrieb, Offroadfunktionen.
	Unterstützung der Wahrnehmung, Erkennung und Erinnerung an Objekte?	3D-Effekte (Licht, Schatten, Textur) z.B. an Icons, Menü- u. Listeneinträgen, Meldungsfenstern, Eingabefeldern
	Erleichterung Abgleich?	Navigation: 3D-Gebäude, landmarks, POI's.
	Steigerung Präsenzerleben?	Starkes Präsenzerleben erhöht die Ablenkung!
Attraktivität	Ist eine Erhöhung der Attraktivität durch eine 3D-Darstellung für die Anwendung erstrebenswert?	Wenn es keine objektiven Vorteile von 3D-Anzeigen geben sollte, aber auch keine Nachteile für die Wahrnehmungssicherheit und Ablenkungswirkung, könnte der Einsatz von 3D-Anzeigen nur aufgrund ihrer noch zu überprüfenden Attraktivität und Akzeptanz gerechtfertigt sein.

**Tabelle 4-2: Fragenkatalog zu den Nachteilen von 3D-Anzeigen**

<b>Nachteil</b>	<b>Allgemeine Fragen</b>	<b>Antworten in Bezug auf Fahrzeug</b>
<b>Präzise räumliche Urteile</b>	Sind präzise räumliche Urteile in allen drei Dimensionen erforderlich?	Abhängig von konkreter Aufgabe
<b>Fokussierung der Aufmerksamkeit</b>	Müssen Teilaufgaben bearbeitet werden, die eine Fokussierung der Aufmerksamkeit auf eine Dimension erfordern?	Abhängig von konkreter Aufgabe
<b>Ablenkungswirkung</b>	Ist eine Erhöhung der Ablenkungswirkung im Vergleich zu inhaltlich identischen 2D-Anzeigen zu erwarten?	Muss in empirischen Untersuchungen zu den jeweiligen 3D-Anzeigen überprüft werden
<b>Orientierungsprobleme</b>	Müssen umfangreiche virtuelle Umgebungen dargestellt werden?	Nicht erforderlich
<b>Freie und kontinuierliche Navigation im Raum</b>	Ist eine freie und kontinuierliche Navigation mit drei und mehr Freiheitsgraden zwingend erforderlich?	Nicht erforderlich
<b>Erfahrungen im Umgang mit 3D-Anwendungen</b>	Sind Erfahrungen mit 3D-Anwendungen erforderlich?	Anzeigen und Interaktionen müssen so gestaltet sein, dass keine 3D-Erfahrungen notwendig
<b>Gestaltungsaufwand</b>	Ist der zusätzliche Gestaltungsaufwand von 3D-Anzeigen zu leisten?	Vertretbar, wenn objektiver und subjektiver Nutzen von 3D vorhanden
<b>Leistungsfähige Hard- und Software</b>	Reicht die zur Verfügung stehende Hard- und Software aus, um 3D-Anzeigen zu realisieren? Welche zusätzlichen Kosten würden entstehen?	Grundvoraussetzungen vorhanden; hoher Aufwand für autostereoskopische Anzeigen

### 4.3 Auswahl einer Beispielaufgabe

Aus der Vielzahl der Anwendungsmöglichkeiten von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen - wie im vorangegangenen Abschnitt angerissen - wird in diesem Abschnitt eine Aufgabe ausgewählt, anhand derer die Aufgabenanalyse, die Gestaltung und die Bewertung des Nutzens und der Grenzen von 3D-Anzeigen in dieser Arbeit beispielhaft vorgenommen wird.

Da es im Fahrzeug nur wenige Aufgaben gibt, in denen tatsächlich dreidimensionale Informationen integriert verarbeitet werden, und die Beherrschung einer stark zunehmenden Anzahl neuartiger Fahrerassistenzsysteme - neben dem Umgang mit umfangreichen Menüsystemen - die wesentliche Herausforderung für die Fahrer darstellt, wurde der Fokus der Arbeit auf 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme gelegt. Dabei besteht das besondere Interesse darin herauszufinden, inwieweit eine räumlich kompatible 3D-Anzeige aus der Fahrerperspektive Vorteile für die Informationsaufnahme und -verarbeitung bei der Nutzung eines Fahrerassistenzsystems erbringen kann. Des Weiteren

dürften die Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen von den potenziellen 3D-Vorteilen Aufmerksamkeitslenkung, Bildhaftigkeit und Attraktivität profitieren können. Da dieses Muster den kleinsten gemeinsamen Nenner an 3D-Vorteilen aller Aufgaben des Fahrers darstellt, bei deren Ausführung 3D-Anzeigen unterstützend wirken können, sollten die Ergebnisse der Untersuchungen zu 3D-Anzeigen eines Fahrerassistenzsystems auf andere 3D-Anzeigen in Fahrzeugen generalisierbar sein.



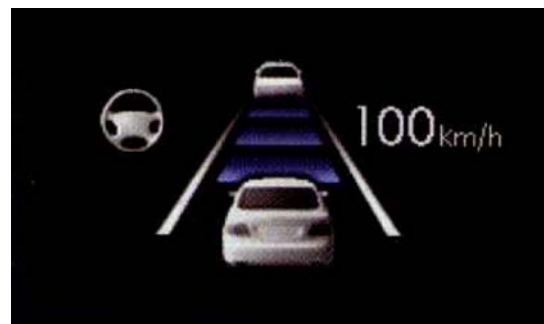
Audi Q7 (2006)



BMW 7 Serie (2002)



Mercedes-Benz S-Klasse (2005)



Lexus LS 460 (2007)

#### Abbildung 4-1: Beispiele für Anzeigen des Abstandsregeltempomaten

Als konkretes Beispiel eines Fahrerassistenzsystems wurde der Abstandsregeltempomat ausgewählt. Dieses System wird seit mehreren Jahren in Fahrzeugen verbaut und verfügt derzeit in Fahrzeugen der Marke Mercedes Benz über eine 2D-Anzeige im Kombiinstrument mit der alternative Entwürfe einer 3D-Anzeige verglichen werden können (s. Abb. 4-1). Zudem ist dieses in die Längsregelung des Fahrers eingreifende System als Stellvertreter für andere regelnde bzw. warnende Systeme zu verstehen wie z.B. Kollisionswarner, Spurhalte-, Totwinkel-, Geschwindigkeits- und Müdigkeitsassistent, welche von verschiedenen Herstellern entwickelt werden bzw. inzwischen bereits auf dem Markt sind. Auf die Anzeigen dieser Systeme sollten sich aufgrund vergleichbarer Aufgabenanforderungen die Untersuchungsergebnisse zum

Nutzen und zu den Grenzen von 3D-Anzeigen, die mit Hilfe des Abstandsregeltempomaten ermittelt werden, direkt übertragen lassen.

Obwohl 3D-Anzeigen der Navigationskarte bereits in vielen Navigationssystemen verfügbar sind und einige Teilaufgaben sogar die integrative Verarbeitung dreidimensionaler Informationen erfordern, wurde die Nutzung des Navigationssystems aus zwei Gründen nicht als Beispielaufgabe verwendet. Zum einen haben die Aufgaben, die bei der Nutzung der Navigationskarte ausgeführt werden, sehr spezielle Anforderungen, die sich schwer auf die Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen oder Komfortfunktionen übertragen lassen. Zum anderen stand zum Zeitpunkt der Durchführung der Experimente dieser Arbeit kein Prototyp einer 3D-Navigationsanwendung zur Verfügung, der in Feld- und Simulatorexperimenten hätte unter realistischen Bedingungen systematisch untersucht werden können.

Da Vorteile von 3D-Anzeigen der Navigationskarte insgesamt jedoch wahrscheinlicher sein sollten als für 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten, stellen letztere eine strengere Bedingung zur Überprüfung potenzieller Vorteile von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen dar.

#### **4.4 Aufgabenanalyse zur Verwendung von 3D-Anzeigen**

Im Detail wird ein Vorgehen der Aufgabenanalyse vorgeschlagen, welches sowohl auf alle im Fahrzeug anfallenden Aufgaben als auch auf Aufgaben in anderen Einsatzgebieten angewendet werden kann. Potenziell sinnvoll erscheinende Aufgaben stellen den Ausgangspunkt der Aufgabenanalyse dar. Wenn möglich, wird die ausgewählte Aufgabe zunächst in Teilaufgaben zerlegt, die unterschiedliche Informationen oder Handlungen erfordern. Danach wird anhand des Fragenkatalogs zu den Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen überprüft, inwieweit die Aufgabenbearbeitung davon profitieren kann, dass Informationen in 3D abgebildet werden. Je mehr Fragen zu den Vorteilen mit „Ja“ beantwortet werden, desto größer ist der Nutzen einer 3D-Anzeige für die jeweilige Aufgabe. Dieser geschätzte Nutzen von muss den Kosten gegenübergestellt werden, in dem die Fragen zu den Nachteilen beantwortet werden. Je mehr Fragen hier mit „Nein“ beantwortet werden, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die 3D-Nachteile die zuvor abgeschätzten 3D-Vorteile nicht übertreffen. Wenn die 3D-Nachteile bei der Gestaltung der Anzeigen, Bedienelemente und Interaktionen beachtet werden, können diese unter Umständen vollständig eliminiert werden (vgl. Kap. 5).

Im Folgenden wird die Aufgabenanalyse zur Verwendung von 3D-Anzeigen anhand des Beispiels „Fahren mit dem Abstandsregeltempomaten“ durchgeführt. Der Abstandsregeltempomat hält wie der konventionelle Tempomat eine vorgegebene Geschwindigkeit konstant und regelt darüber hinaus den Abstand

zu einem vorausfahrenden Fahrzeug, indem das System selbsttätig bremst und beschleunigt. Vorausfahrende Fahrzeuge werden mit Hilfe eines am Kühlergrill angebrachten Radarsensors in einem kegelförmigen Bereich bis zu 150 m vor dem eigenen Fahrzeug erkannt. Das System übernimmt die Längsregelung in einem Geschwindigkeitsbereich von 30 bis 180 km/h. Eine Warnmeldung zeigt dem Fahrer an, wenn eine stärkere Verzögerung als  $-2 \text{ m/s}^2$  (ca. 20% der maximalen Bremskraft) erforderlich ist und er das Bremsen wieder selbst übernehmen muss. Der Fahrer kann das System ein- und ausschalten sowie die Geschwindigkeit und den Abstand vorgeben. Der Abstand wird als Zeitabstand stufenlos von 1 s bis 2 s eingestellt, d.h. der Abstand in Metern verändert sich in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Alle Teilaufgaben und erforderlichen Informationen sind in Tabelle 4-3 aufgeführt.

Im Vergleich zum Fahren ohne Abstandsregeltempomaten entfällt zwar die Aufgabe der Längsregelung, dafür kommen neue Aufgaben hinzu wie die Einstellung des Systems, die Überwachung der Systemfunktionalität, die Berücksichtigung der Systemgrenzen und die Entscheidung darüber, ob und wann ein Eingreifen des Fahrers in das System erforderlich ist (vgl. Rudin-Brown & Parker, 2004; Stanton & Young, 2005). Die Anzeige des Abstandsregeltempomaten unterstützt den Fahrer bei der Ausführung dieser Aufgaben und leistet einen Beitrag zur Erhöhung der *situation awareness* (vgl. Stanton & Young, 2005). Diese besteht nach Endsley (1995) darin, alle wichtigen Informationen wahrzunehmen, die aktuelle Situation zu verstehen und zukünftige Ereignisse vorherzusagen. Gerade der Einsatz des Abstandsregeltempomaten (oder anderer Assistenzsysteme, die Teile der primären Fahraufgabe übernehmen) kann dazu führen, dass die *situation awareness* beeinträchtigt ist, weil der Fahrer von der aktiven Tätigkeit des Steuerns zur passiven Tätigkeit des Überwachens wechselt (Bainbridge, 1983; Rudin-Brown & Parker, 2004; Stanton & Young, 2005). Der Inhalt der Anzeige kann jedoch so gestaltet werden, dass dieser möglichen Verringerung der *situation awareness* entgegen gewirkt wird. Darüber hinaus dürfte die Anzeige des Abstandsregeltempomaten vor allem in der Lernphase dazu beitragen, ein angemessenes Verständnis für die Funktionsweise und die Grenzen des Systems aufzubauen (vgl. Weinberger, Winner & Bubb, 2001). Insgesamt verringert sich durch den Einsatz des Abstandsregeltempomaten die kognitive Beanspruchung, auch wenn in der vorangegangenen Erläuterung ein gegenteiliger Eindruck entstanden sein sollte (Hoedemaeker & Brookhuis, 1998; Rudin-Brown & Parker, 2004; Young & Stanton, 2004).

**Tabelle 4-3: Aufgabenanalyse „Fahren mit dem ART“**

Teilaufgaben des Fahrers	1) Nur Querregelung: Lenken; Spur halten	
	2) Eingreifen in Längsregelung: Bremsen, sobald Warnmeldung; Gas geben, falls Beschleunigung beim Überholen u.ä. nicht ausreicht; Bremsen oder Gas geben bei Systemfehler	
	3) Einstell. am System: ein/aus; ein mit Wiederaufnahme der zuletzt gewählten Geschw.; Wunschgeschwindigkeit; Wunschabstand	
	4) Überwachung des Systems: s. Informationen	
	5) Berücksichtigung der Grenzen des Systems: s. Informationen	
Informationen	Zu 1) Alle Informationen in der Außensicht	
	Zu 2) Warnmeldung bei Übernahmesituation	
	Zu 3) Rückmeldungen zu Einstellungen des Systems: s. Teilaufg.	
	Zu 4) Überwachung des Systems: vorausfahrendes Fahrzeug erkannt/nicht erkannt; gefahrene Geschwindigkeit; aktueller Abstand; Wunschabstand eingehalten/unter-/überschritten; Geschw. vorausfahrendes Fahrzeug; System passiv, sobald Fahrer Gas gibt	
	Zu 5) Berücksichtigung der Grenzen des Systems: Erfassungsbe- reich Sensor; Geschwindigkeitsbereich System; Rückmeldung, wenn einschalten nicht möglich bzw. wenn System sich selbsttätig abschaltet; Erschließen von Erfassungsfehlern des Sensors	
Vorteile		
Integration	Nein	Räumliche Informationen in einer Dimension (Tiefe): Wunschabstand, tatsächlicher Abstand, Erfassungsbereich des Sensors; kein räumliches Verständnis; keine räumlichen Bedienhandlungen
Räumliche Kompatibilität	Ja	Abgleich Außensicht - Anzeige erforderlich; Szene und Abstandsinformationen kompatibel aus der Perspektive des Fahrers anzeigen
Aufmerksamkeitslenkung	Ja	Hervorhebung Warnmeldung, wenn vor anderen Infos angezeigt
Bildhaftigkeit	Ja	Bildhafte Darstellung einer Szene aus eigenem und vorausf. Fahrzeug kann unmittelbares Verständnis steigern
Attraktivität	Ja	Attraktive 3D-Darstellung fördert Interesse an System
Nachteile		
Präzise räumliche Urteile	Nein	Keine präzisen räumlichen Urteile über Abstände in der Tiefe mit Anzeige; werden anhand der Außensicht gefällt
Fokussierung der Aufmerksamkeit	i. O.	Nur Infos zu Abstand in der Tiefe wichtig (= 1D), aber auch keine anderen veränderlichen Infos dargestellt
Ablenkung	Offen	Muss für Anwendungsfall empirisch untersucht werden
Orientierungsprobleme	Nein	Einfache virtuelle Umgebung mit zwei Fahrzeugen und Straße
Freie und kont. Navigation	Nein	Keine Bedienhandlungen in der Anzeige erforderlich.; Systembedienung mit Lenkstockhebel
Erfahrungen mit 3D-Umgebungen	Nein	Keine Veränderungen in der 3D-Anzeige und keine 3D-Bedienhandlungen erforderlich
Gestaltungsaufwand	i. O.	Vertretbar, bei objektivem und subjektivem Nutzen
Hard- und Software	i. O.	Prozessor- und Grafikkartenleistung in Serienfahrzeugen reicht aus; ABER: Hoher Aufwand für ASD

Beim Fahren mit dem Abstandsregeltempomaten sind zwar keine dreidimensionalen Informationen integriert zu verarbeiten, aber die Information über den Abstand in der Tiefe (Wunschabstand, tatsächlicher Abstand, Wunschabstand eingehalten/unter-/überschritten, Erfassungsbereich des Sensors) und die bildhafte Umsetzung der Szene aus dem eigenen und vorausfahrenden Fahrzeug können räumlich kompatibel aus der Perspektive des Fahrers dargestellt werden. Dies dürfte sinnvoll sein, da von einem notwendigen Abgleich zwischen Außensicht und Anzeige ausgegangen werden kann. Die Nachteile der perspektivischen Verkürzung von 3D-Anzeigen in der Tiefe sollten sich nicht negativ auf die Informationsaufnahme aus der Anzeige auswirken, da anhand der Anzeige lediglich grobe räumliche Urteile getroffen werden müssen. Der absolute Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug wird anhand der Außensicht und nicht anhand der Anzeige bestimmt. Die Warnmeldung zur Übernahme der Kontrolle kann über die Position in der Tiefe hervorgehoben werden. Bildhafte 3D-Anzeigen sollten das unmittelbare Verständnis der Funktionsweise, der Grenzen, der Anzeigen, der Bedienung sowie der Warnungen fördern sowie die Attraktivität des gesamten Systems aus Kundensicht steigern. Der mögliche Nachteil einer Erhöhung der Ablenkungswirkung durch eine 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten muss am konkreten Beispiel untersucht werden.

#### 4.5 Fazit

Um zu überprüfen, ob die erwarteten Vorteile einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten räumliche Kompatibilität, Bildhaftigkeit und Attraktivität tatsächlich zum Tragen kommen, wurden im empirischen Teil dieser Arbeit drei Experimente durchgeführt:

- **Experiment 3:** Ist das unmittelbare Verständnis einer bildhaften 3D-Anzeige höher als das einer 2D-Anzeige? (Vorteil Bildhaftigkeit)
- **Experiment 3, 4:** Ist die Attraktivität einer 3D-Anzeige höher als die einer 2D-Anzeige?
- **Experiment 4:** Führen zur Außensicht räumlich kompatible 3D-Anzeigen zu einer schnelleren und fehlerfreieren Bearbeitung von Wahrnehmungsaufgaben als 2D-Anzeigen?
- **Experiment 5:** Replikation des Experiments 4 mit autostereoskopischen 3D-Anzeigen.

Der mögliche Vorteil von 3D-Anzeigen für eine Hervorhebung der Warnmeldung des Abstandsregeltempomaten (Vorteil Aufmerksamkeitslenkung) wurde aus Aufwandsgründen in dieser Arbeit nicht überprüft.

Die Nachteile und Grenzen von 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten wurden dahingehend untersucht, dass in zwei Experimenten die Wahrnehmungssicherheit und die Ablenkungswirkung erfasst und ausgewertet wurden.

- **Experiment 4:** Welchen Einfluss haben die Dimensionalität, die räumliche Kompatibilität und die visuelle Komplexität von 3D- im Vergleich zu 2D-Anzeigen auf die Wahrnehmungssicherheit und auf die Ablenkungswirkung während der Fahrt?
- **Experiment 5:** Replikation des Experiments 4 mit autostereoskopischen 3D-Anzeigen.

Es wird davon ausgegangen, dass sich aus den Ergebnissen der Untersuchungen zum Nutzen und zu den Grenzen von 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten Schlussfolgerungen auf 3D-Anzeigen anderer Fahrerassistenz- und Informationssysteme sowie von Komfort-, Sicherheits- und Fahrzeugfunktionen ziehen lassen.



## 5 Gestaltungsaspekte von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen

3D-Anzeigen müssen sorgfältig gestaltet werden, damit ihre potenziellen Vorteile zur Geltung kommen können. Gestaltungsparameter wie die Auswahl geeigneter monokularer Tiefenkriterien und visueller Hilfsmittel, die Entscheidung, ob stereoskopische 3D-Anzeigen verwendet und mit welcher Technologie sie umgesetzt werden sowie die Festlegung des Bezugsrahmens, der Perspektive und der geometrischen Parameter der virtuellen Szene sind wichtig, um eine adäquate räumliche Tiefenwahrnehmung sicherzustellen und systematische Wahrnehmungsfehler zu vermeiden. Es gibt viele Beispiele dafür, dass eine suboptimale Gestaltung von 3D-Anzeigen zu Nachteilen oder zum Ausbleiben von erwarteten Vorteilen führt (z.B. Miller, Grisedale & Anderson, 1999; Park & Woldstad, 2000; van Orden & Broyles, 2000). Die in diesem Kapitel berichteten Gestaltungshinweise für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen ergaben sich zum einen aus den Besonderheiten der räumlichen Tiefenwahrnehmung in 3D-Anzeigen im Vergleich zu 2D-Anzeigen und zum anderen aus den Nutzungsbedingungen von 3D-Anzeigen im Fahrzeug im Vergleich zu anderen Kontexten. Im Gegensatz zu anderen eher unspezifischen Sammlungen von Gestaltungshinweisen für 3D-Benutzungsoberflächen (Bowman et al., 2004; Herndon, van Dam & Gleicher, 1994; Shneiderman & Plaisant, 2005; Wickens et al., 1989) wird im Folgenden immer der direkte Bezug der angeführten 3D-Gestaltungshinweise zum Nutzungskontext Fahrzeug hergestellt. Dabei bestehen die besonderen Ziele der nachfolgenden Erläuterungen erstens darin, eine solide Basis der verfügbaren theoretischen und empirischen Befunde für die beispielhafte Gestaltung der 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten zusammenzutragen und zweitens diejenigen offenen Fragestellungen zur Gestaltung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen zu identifizieren, die es zu klären gilt, bevor der Nutzen und die Grenzen von 3D-Anzeigen empirisch untersucht werden können.

### 5.1 Nutzungskontext Fahrzeug

Der Nutzungskontext Fahrzeug stellt andere Anforderungen an die Gestaltung von 3D-Anzeigen als dies in immersiven virtuellen Umgebungen zu Präsentations-, Bildungs- und Unterhaltungszwecken sowie in CAD- und 3D-Visualisierungsprogrammen der Fall ist. Im Folgenden werden die Nutzungsbedingungen von Anzeigen in Fahrzeugen erläutert.

Das **Führen des Fahrzeugs** ist die primäre Aufgabe des Fahrers. Alle weiteren Aufgaben, egal ob sie einen Bezug zur Fahraufgabe oder zum Fahrzeug haben oder lediglich der Bedienung von Unterhaltungs- und Kommunikationsfunktionen dienen, spielen eine untergeordnete Rolle und dürfen mit der Ausführung der Fahraufgabe nicht interferieren. Die einzelnen Teilaufgaben der Fahrzeug-

führung unterscheiden sich hinsichtlich der kognitiven Beanspruchung, die sie für den Fahrer mit sich bringen (s. Abschn. 4.1). Da vom Planen über das Manövrieren bis hin zum Stabilisieren die kontrollierten Informationsverarbeitungsprozesse abnehmen und im Gegenzug die automatisierten zunehmen, sinkt die kognitive Beanspruchung in dieser Reihenfolge. Darüber hinaus verlangt die Fahrzeugführung eine nahezu permanente visuelle Aufmerksamkeit, mindestens eine Hand am Lenkrad und die Füße an den Pedalen. Sekundäraufgaben können den Fahrer visuell, manuell oder kognitiv fordern und in Kombination mit der primären Fahraufgabe seine Verarbeitungskapazitäten überschreiten. Dies führt zu Leistungseinbußen in der einen oder anderen, meist jedoch in beiden Aufgaben (z.B. Bengler, Praxenthaler, Theofanou & Eckstein, 2004; Reed & Green, 1999; Verwey & Veltman, 1996). Wegen der Sicherheitsrelevanz von Leistungseinbußen bei der Fahrzeugführung muss die Vereinbarkeit der Fahraufgabe mit den anfallenden Sekundäraufgaben überprüft werden.

Die **Umgebungsbedingungen** des Fahrens verändern sich dynamisch und können die Fahraufgabe erschweren. Dazu gehören die Straßen- und Verkehrsführung, die Verkehrsdichte, die Fahrbahnbeschaffenheit sowie die Licht- und Sichtbedingungen. Im Inneren des Fahrzeugs wird der Fahrer durch Mitreisende, Geräusche (z.B. Radio, Kinder, Telefon, Verkehrsmeldungen) und die Komforteinstellungen von Sitz, Klima und Licht beeinflusst.

Die **Fahrer** sind keine homogene Benutzergruppe wie z.B. CAD-Konstrukteure oder Piloten. Fahrer zeigen große Unterschiede in der Fahrerfahrung, in der Häufigkeit der Fahrzeugnutzung, im Alter, in den sensumotorischen und kognitiven Leistungsvoraussetzungen, im Fahrstil, in der Einstellung zum Fahrzeug und zum Fahren, um nur einige Variablen zu nennen. Die Nutzung und subjektive Bewertung von 3D-Anzeigen ist vermutlich abhängig von der Sehfähigkeit (z.B. Sehstärke, Farbsehen, stereoskopisches Sehen), der Erfahrung im Umgang mit 3D-Anwendungen, der Erfahrung in der Bedienung von technischen Geräten, der Technikeinstellung und den ästhetischen Vorlieben.

Die Nutzungssituation im **Fahrzeug** schränkt die Optionen der technischen Umsetzung von 3D-Anzeigen ein. Exemplarisch sollen der begrenzte Bauraum, die elektromagnetische Verträglichkeit, extreme Temperatur- und Beleuchtungsbedingungen, Vibrationen während der Fahrt, die begrenzte Prozessor- und Grafikkartenleistung und die begrenzte Speicherkapazität angeführt werden.

## 5.2 Ergonomische Anforderungen an 3D-Anzeigen in Fahrzeugen

Da die Informationen über die Fahrzeugumgebung in allen drei Teilaufgaben der Fahrzeugführung überwiegend visuell und nur in deutlich geringerem Maße auditiv, haptisch und kinästhetisch aufgenommen werden (z.B. Landau, 2002), müssen hinzukommende Informationsausgaben im Fahrzeug sehr sorgfältig gestaltet werden. Andernfalls wird das visuelle System des Fahrers überbeansprucht. Obwohl es vielfältige Möglichkeiten gibt, auf andere Modalitäten auszuweichen (z.B. Oviatt, 2003; Seifert, 2002) und insbesondere im Fahrzeug die auditive Modalität sehr erfolgversprechend ist (z.B. Akyol, Libuda & Kraiss, 2001; Schattenberg & Debus, 2001), kann letztlich auf die visuelle Informationsdarstellung nicht verzichtet werden. Diese bietet hinsichtlich der Menge, Differenzierbarkeit und Eindeutigkeit der Informationen sowie der zeitlichen Parameter ihrer Darbietung Vorzüge. Da von der konkreten Gestaltung der 3D-Anzeigen abhängt, wie visuell beanspruchend sie für den Fahrer sind, muss deren Optimierung hinsichtlich der Wahrnehmungssicherheit eine zentrale Rolle spielen. Die folgenden Aspekte sind wichtig:

- Die visuelle Komplexität von 3D-Anzeigen kann dadurch begrenzt werden, dass nur solche Tiefenkriterien, Objekte, Details und visuellen Hilfsmittel dargestellt werden, die für eine schnelle und eindeutige Tiefenwahrnehmung erforderlich sind.
- Bezugsrahmen, Perspektive und geometrische Parameter der virtuellen Szene müssen so ausgewählt werden, dass keine systematischen Wahrnehmungsfehler entstehen.
- Bewegte Anzeigen, die in keinem Zusammenhang mit der Fahraufgabe stehen, sollten grundsätzlich vermieden werden (AAM, 2006).
- Beschriftungen und 2D-Symbole sollten möglichst parallel zur Bildschirmenebene und nicht auf perspektivisch verzerrten Flächen angebracht werden.
- Objekte, Symbole und Beschriftungen müssen auch bei großer Tiefe erkennbar sein.
- Wichtige Informationen dürfen nicht durch Objekte und Schatten verdeckt werden.
- Transparenzen, Reflektionen und Schatten dürfen die Erkennbarkeit von Objekten nicht behindern. Im Detail gelten die Vorgaben der ISO-Norm 15008 für die Ausführung von Schrift, Pixelmatrix, Kontrasten und Farben auf Anzeigen in Fahrzeugen.
- Bei der Gestaltung von 3D-Symbolen muss die ISO-Norm 2575 beachtet werden.

- Stereoskopische 3D-Displays dürfen nicht stärker reflektieren, blenden oder flackern als konventionelle Displays (vgl. ISO 15008).
- Alle Displays dürfen entsprechend der AAM-Richtlinie (Alliance of Automobile Manufacturers, 2006) nicht mehr als 30° nach unten und 40° seitlich von der Blickrichtung des Fahrers aus dem Fahrzeug abweichen.

Darüber hinaus gelten für die Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle die gleichen Ergonomiekriterien wie für andere Benutzungsschnittstellen auch (vgl. DIN EN ISO 9241-110: Aufgabenangemessenheit, Selbstbeschreibungsfähigkeit, Erwartungskonformität, Steuerbarkeit, Fehlerrobustheit, Lernförderlichkeit, Individualisierbarkeit). Im Fahrzeug sind außerdem eine Unterbrechbarkeit des Dialoges und prompte Systemantwortzeiten ( $< 250$  ms) unerlässlich. Die konsequente Einhaltung der Ergonomiekriterien ist wegen der gleichzeitigen Fahrzeugführung noch wichtiger als in Anwendungsfeldern ohne eine Doppelaufgabenbearbeitung (vgl. ISO 15005; Alliance of Automobile Manufacturers, 2006; Japan Automobile Manufacturers Association, 2004; Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2000, 2005).

### 5.3 Räumliche Tiefenwahrnehmung und Tiefenkriterien

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Grundlagen der räumlichen Wahrnehmung beschrieben, eine Sammlung der wichtigsten Tiefenkriterien vorgestellt und anschließend dahingehend bewertet, wie geeignet die einzelnen Tiefenkriterien für eine Verwendung in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen sind.

Tiefenkriterien sind Informationsquellen über die räumliche Tiefe (vgl. Goldstein, 1997) und wirken psychologisch oder physiologisch (vgl. Falter, Rötting & Springer, 1993). Monokulare Tiefenkriterien stellen über Wahrnehmungshypothesen den Zusammenhang zwischen Umwelt, Netzhaut und räumlicher Tiefenwahrnehmung her (z.B.: Das verdeckte Objekt ist weiter entfernt als das verdeckende), die gelernt werden und später automatisiert wirken. Bewegungsinduzierte und okulomotorische Tiefenkriterien sowie die stereoskopische Disparität werden physiologisch ausgewertet. Alle in einer Reizkonfiguration enthaltenen Tiefenkriterien werden zur Erzeugung des Tiefeneindrucks herangezogen, wobei jedes einzelne mit unterschiedlicher Bedeutung dazu beiträgt (*gewichtetes additives Modell*: Bruno & Cutting, 1988; Ichikawa & Saida, 1996; Young, Landy & Maloney, 1993). Zudem ist die Wirkung einzelner Tiefenkriterien davon abhängig, mit welchen anderen sie kombiniert werden und welche Aufgabe gelöst wird. Grob zusammengefasst ist der Tiefeneindruck umso schneller und genauer, je mehr und je stärkere Tiefenkriterien in einer Anzeige enthalten sind (Künnapas, 1968; Mazur & Reising, 1990; Zenyuh, Reising & Walchli, 1988). In einigen Studien

stellten sich ab zwei Tiefenkriterien jedoch keine weiteren Verbesserungen in der Tiefenwahrnehmung ein (Alm, Lif & Öberg, 2003; Kim, Ellis et al., 1987; Mazur & Reising, 1990). Wenn die Informationen von einem oder mehreren Tiefenkriterien uneindeutig oder widersprüchlich sind, dann werden die restlichen Tiefenkriterien zur Auflösung dieser Widersprüche verwendet (z.B. Pong, Kenner & Otis, 1990). Ausführliche Darstellungen zur räumlichen Wahrnehmung finden sich in Goldstein (1997), Ware (2004), Schiffmann (2001), Wickens et al. (1989), Cutting & Vishton (1995). Im Folgenden werden die Merkmale der wichtigsten Tiefenkriterien erläutert.

### 5.3.1 Bildhafte monokulare Tiefenkriterien

Mit bildhaften monokularen Tiefenkriterien<sup>3</sup> entsteht ein Tiefeneindruck selbst dann, wenn eine Abbildung mit nur einem Auge betrachtet wird. Sie sind von der Perspektive und voneinander abhängig. Künstler verwenden sie, um in Gemälden Tiefe darzustellen.

- **Lineare Perspektive.** Linien, die in der realen Welt parallel verlaufen, konvergieren in einem Fluchtpunkt in der Ferne. Dadurch werden weiter entfernte Objekte kleiner, dichter, verkürzter und unterhalb des Horizonts höher dargestellt als nähere Objekte. Aus der Perspektive resultiert die Ausprägung fast aller anderen monokularen Tiefenkriterien.
- **Relative und bekannte Größe.** Die Wahrnehmung der Größe und der Entfernung eines Objektes bedingen einander. Je nachdem, ob die Größe oder die Entfernung eines Objektes bekannt ist, kann auf die jeweils andere Variable geschlossen werden (*Größeninvarianzhypothese*:  $\text{Größe} = \text{Sehwinkel} \times \text{Entfernung}$ ). Wenn beispielsweise bekannt ist, dass zwei Objekte die gleiche Größe haben, dann erscheint das Objekt, welches einen kleineren Sehwinkel auf der Netzhaut einnimmt, weiter entfernt als das Objekt, welches einen größeren Sehwinkel benötigt.
- **Relative Höhe.** Unterhalb des Horizontes erscheint ein tiefer positioniertes Objekt näher als ein höheres. Oberhalb des Horizontes ist es umgekehrt.
- **Textur.** Elemente einer gleichmäßigen Textur erscheinen auf einer Fläche, die entlang der Sichtlinie ausgerichtet ist, in der Ferne kleiner, dichter und stärker verkürzt als in der Nähe. Der Texturgradient wirkt besser bei regelmäßigen Mustern als bei zufälligen, da über eine regelmäßige Textur auf die Größe von Objekten geschlossen werden kann (Gibson, 1979). Schwache Kontraste innerhalb der Textur verhindern Interferenzen mit der Wahrnehmung von Schatten und Objekten (Ware, 2004).

---

<sup>3</sup> Ab hier nur noch monokulare Tiefenkriterien genannt.

- **Verdeckung.** Wenn ein Objekt ein anderes teilweise verdeckt, dann liegt das verdeckende Objekt vor dem verdeckten. Transparenzen geben die Sicht auf verdeckte Objekte frei, erhöhen aber die visuelle Komplexität.
- **Helligkeit und Licht.** Je größer der Helligkeitsunterschied zwischen zwei Objekten oder zwischen zwei Bereichen innerhalb eines Objektes ist, desto größer ist der empfundene Tiefenunterschied (Wickens et al., 1989). Helle Bereiche eines Objektes erscheinen den meisten Beobachtern näher als dunkle (*Proximity Luminance Covariance, PLC*: Doshier, Sperling & Wurst, 1986). Helligkeit und Licht informieren insbesondere über die 3D-Form und die Oberflächeneigenschaften eines Objektes.
- **Schatten.** Wenn Objekte aus einer Richtung beleuchtet werden, werfen sie Schatten auf andere Objekte (*cast shadows*) und informieren dadurch über die Entfernung zwischen den Objekten. Die Ränder eines Schattens müssen unscharf sein. Die exakte Kontur und Position eines Schattens sind weniger wichtig. Schatten auf der Oberfläche eines Objektes (*attached shadows*) informieren über dessen Material und 3D-Form. Da in der Umwelt die Beleuchtung meist von oben kommt, sind Schatteneffekte durch Lichtquellen von oben am wirkungsvollsten. (vgl. Ware, 2004)
- **Atmosphärische Tiefe.** Die Luft besteht aus Gasmolekülen und Schmutzpartikeln. Je weiter entfernt vom Beobachter sich ein Objekt befindet, desto mehr Partikel befinden sich zwischen ihnen. Als Folge erscheint ein weiter entfernter Gegenstand unschärfer, kontrastärmer, weniger gesättigt, dunkler und blauer als ein naher Gegenstand.
- **Tiefenfokus.** Mit zunehmender Entfernung zum fixierten Objekt werden alle anderen Objekte weniger scharf wahrgenommen. Dieser Effekt kann zur Hervorhebung oder Ausblendung von Objekten verwendet werden (Ware, 2004).

### 5.3.2 Bewegungsinduzierte Tiefenkriterien

Durch relative Bewegungen zwischen einem Beobachter und Objekten kann ein Tiefeneindruck ausgelöst werden. Es reichen leichte Kopfbewegungen aus.

- **Bewegungsparallaxe.** Wenn sich ein Beobachter und Objekte aneinander vorbei bewegen, scheinen sich nahe Objekte schneller zu bewegen als ferne, weil die nahen Objekte in der gleichen Zeit einen weiteren Weg auf der Netzhaut des Auges zurücklegen als die fernen (vgl. Schiffman, 2001). Wenn sich der Beobachter in einer Szene vorwärts auf Objekte zu bewegt, entsteht um ihn herum ein Geschwindigkeitsfeld, in dem nahe Objekte schneller vorbei fließen als ferne (*optical flow*: Gibson, 1979).

- **Kinetischer Tiefeneffekt (*Kinetic Depth Effect*).** Wenn der Schatten oder die Kontur eines um die x- oder y-Achse rotierenden Objektes auf eine Fläche projiziert wird, kann der Beobachter von der veränderlichen 2D-Projektion auf die 3D-Form des Objektes schließen (Braunstein & Anderson, 1984; Wallach & O'Connell, 1953). Dies erklärt, warum beim Drehen von CAD-Modellen ein Tiefeneindruck entsteht. Für die Integration der sequenziellen Bilder ist eine ausreichende Betrachtungszeit notwendig.

### 5.3.3 Okulomotorische Tiefenkriterien

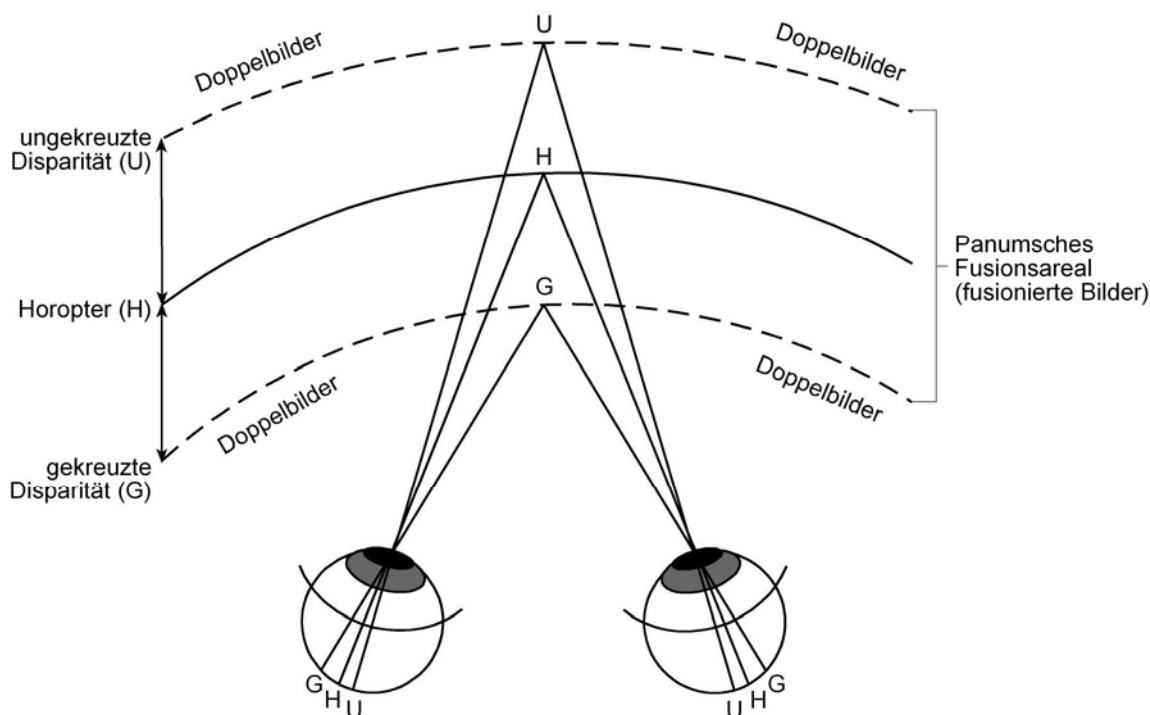
- **Konvergenz.** Die Augen bewegen sich nach innen, sobald ein Objekt in der Nähe fixiert wird und nehmen bei der Fixation von Objekten in der Ferne eine parallele Stellung ein. Die Tiefeninformation ist der Winkel, in dem die Augen zueinander stehen.
- **Akkommodation.** Die Linse des Auges verdickt sich, sobald ein Objekt in der Nähe fixiert wird und flacht bei der Fixation von fernen Objekten ab. Die Tiefeninformation verbirgt sich in der Anspannung des Ciliarmuskels, der die Form der Linse verändert.

### 5.3.4 Stereoskopische Disparität als Tiefenkriterium

Das Prinzip und die Bedeutung der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung werden in diesem Abschnitt detailliert erläutert, damit Schlussfolgerungen über sinnvolle Anwendungen von stereoskopischen Anzeigen in Fahrzeugen gezogen und Gestaltungshinweise abgeleitet werden können. Weiterführende Darstellungen finden sich in Patterson & Martin (1992), Goldstein (1997) und Schiffmann (2001). Abbildung 5-1 informiert graphisch über die im Folgenden beschriebenen Zusammenhänge.

Die stereoskopische Tiefenwahrnehmung beruht darauf, dass aufgrund der vorwärts gerichteten und im Abstand von ca. 6,4 cm angeordneten Augen überlappende Sehfelder entstehen, deren Netzhautbilder leicht voneinander abweichen. Die Abweichung der Netzhautbilder des rechten und linken Auges wird als *stereoskopische Disparität* bezeichnet. Da die Augen nebeneinander angeordnet sind, beruht die *Stereopsis* größtenteils auf der horizontalen Disparität (Patterson & Martin, 1992). Im visuellen Cortex werden die abweichenden Netzhautbilder zu einem einheitlichen Bild fusioniert, das zudem Tiefeninformationen enthält. Ein Objekt, das fixiert wird, und alle anderen Objekte, die sich in gleicher Distanz zum Betrachter (auf dem *Horopter*) befinden, fallen auf korrespondierende Netzhautpunkte und haben die Disparität Null. Wegen der Position der Abbildungen der Objekte auf den Netzhäuten wird die Disparität für Objekte innerhalb des Horopters als gekreuzt und für Objekte außerhalb des Horopters als ungekreuzt bezeichnet.

Je weiter in beide Richtungen vom Horopter entfernt sich Objekte befinden, desto größer ist deren Disparität und desto schwerer fällt die Fusion. Der Bereich um den Horopter, in dem eine Fusion möglich ist, wird als *Panumsches Fusionsareal* bezeichnet. Dieses ist in der Umgebung der Fovea schmaler (ca.  $\pm 10$  Bogenminuten) als in der Peripherie (ca.  $\pm 20$  Bogenminuten) und hängt von der Stimulusart (einfach/komplex), der Stimulusgröße, der Bildschärfe, der räumlichen Frequenz, der zeitlichen Frequenz, der Richtung der Disparität und der Häufigkeit von Vergenzbewegungen ab (Patterson & Martin, 1992). Komplexe, große, unscharfe, seitlich weit voneinander entfernte, langsam bewegte und innerhalb des Horopters dargebotene Objekte werden auch bei größeren Disparitäten fusioniert, insbesondere, wenn mehrere Vergenzbewegungen ausgeführt werden. Bei zu großen Disparitäten scheitert die Fusion und der Betrachter sieht Doppelbilder. Doppelbilder nicht fixierter Objekte werden in der natürlichen Wahrnehmung gewöhnlich unterdrückt. *Binokulare Rivalität* entsteht, wenn korrespondierende Netzhautpunkte mit Bildern unterschiedlicher Objekte oder Helligkeiten stimuliert werden. Es wird dann nur ein sehr flüchtiges Bild fusioniert, das zwischen rechtem und linkem Bild alterniert (Patterson, 1997). Zufallsstereogramme zeigen, dass außer der stereoskopischen Disparität kein weiteres Tiefenkriterium notwendig ist, um räumliche Tiefe zu erleben (Julesz, 1971).



**Abbildung 5-1: Prinzip der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung**

Vgl. Goldstein (1997, S. 228) und Schiffmann (2001, S. 235). Erläuterungen im Text.

Die stereoskopische Disparität wird häufig als das Tiefenkriterium angesehen, welches einen „echten“ oder „wahren“ 3D-Eindruck verspricht und deshalb



wichtiger als alle anderen ist. Tatsächlich empfinden viele Nutzer den Tiefeneindruck in stereoskopischen 3D-Anzeigen intensiver und attraktiver als in monoskopischen (Hutarew et al., 2004; McWorther et al., 1991; Steiner & Dotson, 1990; Yeh & Silverstein, 1992). Seit der Erfindung des Stereoskops in der Mitte des 19. Jahrhunderts bis in die Zeit der 3D-IMAX-Kinos sehen sich Menschen stereoskopische 3D-Anzeigen und -Filme zum reinen Vergnügen an. Neben den subjektiven gibt es objektive Gründe, die für eine besondere Bedeutung der stereoskopischen Disparität für die Tiefenwahrnehmung sprechen:

- Die stereoskopische Disparität wirkt physiologisch über binokuläre Neuronen (vgl. Goldstein, 1997; Patterson & Martin, 1992; Schiffman, 2001).
- Sie erlaubt die Entdeckung kleinster Tiefenunterschiede mit einer Auflösung von ca. 10 Bogensekunden (Patterson & Martin, 1992).
- Sie klärt als eindeutiges Tiefenkriterium Konflikte zwischen Tiefenkriterien auf und reduziert die Ambiguität von Tiefenurteilen entlang der Sichtlinie (vgl. Wickens & Hollands, 2000; Wickens et al., 1989).
- Sie ist ein starkes Tiefenkriterium (Übersicht in Wickens et al., 1989).

Andererseits gibt es Fakten, die eine besondere Bedeutung der stereoskopischen Disparität als Tiefenkriterium anzweifeln lassen:

- Die stereoskopische Disparität entfaltet ihre Wirkung nur im Greifraum.
- Ohne Mithilfe anderer Tiefenkriterien wie Konvergenz, Akkomodation und Perspektive können keine absoluten Tiefenurteile getroffen werden.
- Die Tiefenkriterien Verdeckung (Brown & Gallimore, 1995; Übersicht in Wickens et al., 1989) und Bewegung (Sollenberger & Milgram, 1993; Ware & Franck, 1996) entfalten eine noch stärkere Wirkung.
- Ca. 10 % der Bevölkerung sind stereoblind bzw. haben eine Stereosehschwäche, ohne dass dies zu Beeinträchtigungen im Alltag führt.

Da die Vorteile der stereoskopischen Disparität nicht so eindeutig sind, wie oft behauptet wird, und autostereoskopische 3D-Anzeigen nur mit großem technischen Aufwand in Fahrzeugen zu realisieren sind, wird in dieser Arbeit der Nutzen einer stereoskopischen Darbietung systematisch untersucht.

### ***5.3.5 Bewertung und Auswahl der Tiefenkriterien***

Alle Tiefenkriterien wurden dahingehend bewertet, wie gut sie sich für eine Verwendung in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen eignen (s. Tab. 5-1). Dabei wurden die Stärke der Wirkung, die optimale Distanz, der kleinste wahrnehmbare Tiefenunterschied, die Art der Tiefeninformation und der technische Aufwand berücksichtigt.

Die Tiefenkriterien Perspektive (inkl. relative Größe und Höhe) und Helligkeit/Licht sind notwendige Grundlagen jeder 3D-Darstellung und werden in dieser Arbeit als sinnvolle Grundausswahl an Tiefenkriterien angesehen, die eine geringe visuelle Komplexität und dadurch eine geringe Ablenkungswirkung sowie einen geringen technischen Aufwand versprechen. Da es sich bei dieser Auswahl jedoch nur um wenige Tiefenkriterien mit mittlerer Wirkungsstärke handelt, ist fraglich, ob die Tiefenwahrnehmung mit dieser Auswahl ausreichend schnell und eindeutig ist. Deshalb werden darüber hinaus die Tiefenkriterien Textur, Verdeckung, Schatten und stereoskopische Disparität als Optionen angesehen, die die Tiefenwahrnehmung in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen verbessern können, aber auch Kosten mit sich bringen. Die Verdeckung kann verwendet werden, wenn gewährleistet ist, dass alle wesentlichen Details erkennbar sind. Textur und Schatten erfordern zusätzlichen technischen Aufwand und beinhalten die Gefahr, die visuelle Komplexität zu erhöhen. Fahrzeugtaugliche autostereoskopische Displays bedeuten einen hohen technischen Aufwand und sind nur dann gerechtfertigt, wenn sie einen deutlichen Nutzen für die Tiefenwahrnehmung erbringen bzw. die Attraktivität der Anzeigen verbessern, ohne die Ablenkungswirkung zu erhöhen. Die bewegungsinduzierten Tiefenkriterien können in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen nicht verwendet werden, da bewegte Anzeigen, die nicht im Zusammenhang mit einer Veränderung der dargestellten Funktion stehen, in Fahrzeugen grundsätzlich vermieden werden sollten (AAM, 2006). Die Konvergenz wirkt nur in stereoskopischen Anzeigen, die Akkommodation nur in der Realität.

**Tabelle 5-1: Bewertung der Tiefenkriterien**

Tiefenkriterium	Wirkung	Distanz	$\Delta$ Tiefe	Information	Aufwand	Fzg	Bemerkungen zur Verwendung im Fahrzeug
Lineare Perspektive	mittel	( $\leftrightarrow$ )	mittel	rD, aD	gering	✓	Grundlage für 3D-Szene. Schrift parallel zu Bildebene.
Relative und bekannte Größe	mittel	( $\leftrightarrow$ )	mittel	rD, aD	gering	✓	= Perspektive. Schrift/wichtige Objekte in der Nähe. Reduzieren, wenn Erkennbarkeit leidet.
Relative Höhe	schwach	3–500m ( $\downarrow$ )	mittel	rD, aD	gering	✓	= Perspektive
Textur	mittel	( $\leftrightarrow$ )	mittel	rD, aD, 3D-F	mittel	offen	= Perspektive. Erhöht die visuelle Komplexität. Aufwand.
Verdeckung	stark	( $\leftrightarrow$ )	genau	rD, ordinal	gering	✓	Keine wichtigen Details verdecken. Einfach umsetzbar.
Helligkeit und Licht	mittel	( $\leftrightarrow$ )	mittel	rD, 3D-Form	gering	✓	Einfaches Lichtmodell mit Lichtquelle von oben und optional einer seitlichen Lichtquelle (Ware, 2004).
Schatten	mittel	-	mittel	rD, 3D-Form	mittel	offen	Keine wichtigen Details verdecken. Erhöht die visuelle Komplexität. Aufwand.
Atmosphärische Tiefe	schwach	ab 1km ( $\uparrow$ )	grob	rD	mittel	✗	Nur für große Distanzen. Verringert die Erkennbarkeit. Geeignet zum Ausblenden weit entfernter Objekte.
Tiefenfokus	schwach	-	grob	rD	hoch	✗	Aufwändige Kopplung mit Blickerfassung notwendig.
Bewegungsparallaxe	stark	bis 60m ( $\downarrow$ )	genau	rD, 3D-Form	mittel	✗	Keine bewegten Bilder während der Fahrt, die keinen Bezug zur Fahraufgabe haben (AAM, 2006).
Kinetic Depth	stark	-	-	3D-Form	mittel	✗	s. Bewegungsparallaxe. Dauert zu lange.
Konvergenz	schwach	bis 2m ( $\downarrow$ )	mittel	rD, aD	hoch	offen	In natürlicher Umwelt und mit stereoskopischen Displays.
Akkommodation	schwach	bis 2m ( $\downarrow$ )	mittel	rD, aD	-	-	In natürlicher Umwelt. Mit stereoskopischen Displays Akkommodation immer nur auf Bildebene.
Stereoskopische Disparität	stark	bis 50m ( $\downarrow$ )	genau	rD, 3D-Form	hoch	offen	Qualität und Wirkung von fahrzeugtauglichen autostereoskopischen Displays (ASD) muss überprüft werden.

Anmerkungen: Wirkung: Qualitative Einschätzung, da quantitative Wirkungsunterschiede von Methodik abhängig (vgl. Cutting & Vishton, 1995; Hammer, 1998; Ware, 2004; Wickens, Todd & Seidler, 1989). Distanz in Metern; Verlauf der Wirkung: ( $\leftrightarrow$ ) gleichbleibend; ( $\downarrow$ ) abnehmend; ( $\uparrow$ ) ansteigend (vgl. Cutting & Vishton, 1995; Falter, Rötting & Springer, 1993).  $\Delta$  Tiefe = Tiefenunterschied: Qualitative Einschätzung, da abhängig von absoluter Distanz und Methodik (vgl. Cutting & Vishton, 1995). Information: aD = absolute Distanz; rD = relative Distanz; 3D-Form (vgl. Cutting & Vishton, 1995; Wickens, Todd & Seidler, 1998). Aufwand: gering = Grundfunktion von 3D-Programmen, geringer Rechenaufwand (RA); mittel = übliche Zusatzfunktion, mittlerer RA; hoch = zusätzliche Programmmodule/Hardware, hoher RA; RA = Rechnerleistung für Echtzeit-Wiedergabe + Leistungsfähigkeit Grafikkarte und -speicher + Modellierungsaufwand. Fahrzeug: ✓ = geeignet; ✗ = ungeeignet.

### 5.3.6 *Fazit*

Da die Wirkung der Tiefenkriterien davon abhängig ist, in welcher Kombination sie verwendet werden und wie die Versuchsreize im Einzelnen gestaltet sind (z.B. Anzahl und Art der Objekte, Größe, Form, Anordnung, Farben) können anhand der Literaturanalyse keine endgültigen Entscheidungen darüber getroffen werden, welche Tiefenkriterien konkret in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen verwendet werden sollten. Nach dem Vorschlag von Hsu et al. (1996) sollte deshalb jede Anwendung für sich untersucht werden, um die richtigen Gestaltungsentscheidungen fällen zu können. Darüber hinaus kann die Auswahl der Tiefenkriterien für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen nicht ausschließlich danach getroffen werden, dass ein schneller und eindeutiger Tiefeneindruck entsteht, sondern es muss ein Kompromiss zwischen der Menge und Art der Tiefenkriterien und der visuellen Komplexität der Anzeige gefunden werden. Der technische Aufwand ist ebenfalls ein wichtiger Faktor.

Im empirischen Teil werden deshalb Experimente zu folgenden Fragen durchgeführt:

- **Experiment 1:** Wie viele und welche Tiefenkriterien sind notwendig, um einen adäquaten räumlichen Tiefeneindruck entstehen zu lassen?
- **Experiment 4 und 5:** Welchen Einfluss hat die visuelle Komplexität einer 3D-Anzeige auf die Wahrnehmungssicherheit und auf die Ablenkungswirkung während der Fahrt?
- **Experiment 1, 2 und 5:** Welchen zusätzlichen Nutzen für die Tiefenwahrnehmung bringt die (auto)stereoskopische Darbietung einer 3D-Anzeige?

## 5.4 Stereoskopische Anzeigen

Nachdem in Abschnitt 5.3.4 die Prinzipien der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung beschrieben wurden, werden hier zunächst die Bedingungen herausgearbeitet, unter denen Vorteile eines Einsatzes von stereoskopischen Anzeigen zu erwarten sind. Anschließend wird ein Überblick zu deren optimaler Ausführung in Fahrzeugen gegeben.

### 5.4.1 *Einsatzbedingungen für stereoskopische Anzeigen*

Abgeleitet aus den empirischen Befunden in der Literatur werden nachfolgend die Bedingungen aufgeführt, unter denen Stereo-Vorteile zu erwarten sind.

Während in einigen Studien eine stereoskopische Darbietung statischer Anzeigen mit monokularen Tiefenkriterien einen Nutzen für die Tiefenwahrnehmung erbrachte (Barfield & Rosenberg, 1995; van Orden & Broyles, 2000; Way, 1988; Wickens et al., 1994; Yeh & Silverstein, 1992), war dies - trotz

vergleichbarer Versuchsreize und -aufgaben - in anderen nicht der Fall (Hendrix & Barfield, 1997; Hollands et al., 1998; Mazur & Reising, 1990). Stereovorteile zeigen sich, ...

- Wenn die Anzeigen kaum monokulare Tiefenkriterien bzw. zu wenige oder zu kleine Objekte enthalten, an denen monokulare Tiefenkriterien wirken können (Doshier et al., 1986; Grossman & Balakrishnan, 2006; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick & Stark, 1987; Sollenberger & Milgram, 1993; van der Meer, 1979; Viswanathan & Mingolla, 2002; Ware & Franck, 1996; Xiao & Milgram, 1992; Zenyuh et al., 1988);
- Wenn die monokularen Tiefenkriterien uneindeutig (Brown & Gallimore, 1995) oder durch die Sichtbedingungen in ihrer Wirkung eingeschränkt sind (Pepper, Smith & Cole, 1981);
- Wenn die Anzeigen keine visuellen Hilfsmittel wie Gitternetz- oder Verbindungslinien enthalten (Grossman & Balakrishnan, 2006; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Park & Woldstad, 2000);
- Wenn kleine Tiefenunterschiede erkannt werden (Yeh & Silverstein, 1992);
- Wenn die Aufgabe dadurch schwieriger ist, dass zwischen mehreren Objekten ausgewählt werden muss (Zenyuh et al., 1988);
- Wenn die Nutzer keine Erfahrungen mit einer Anwendung haben (z.B. bei der Endoskopie, Übersicht in Tendick & Cavusoglu, 1997) und
- Wenn räumliche Urteile in Perspektiven mit ungünstiger Auflösung in der Höhe und Tiefe gefällt werden müssen (Barfield & Rosenberg, 1995; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Yeh & Silverstein, 1992).

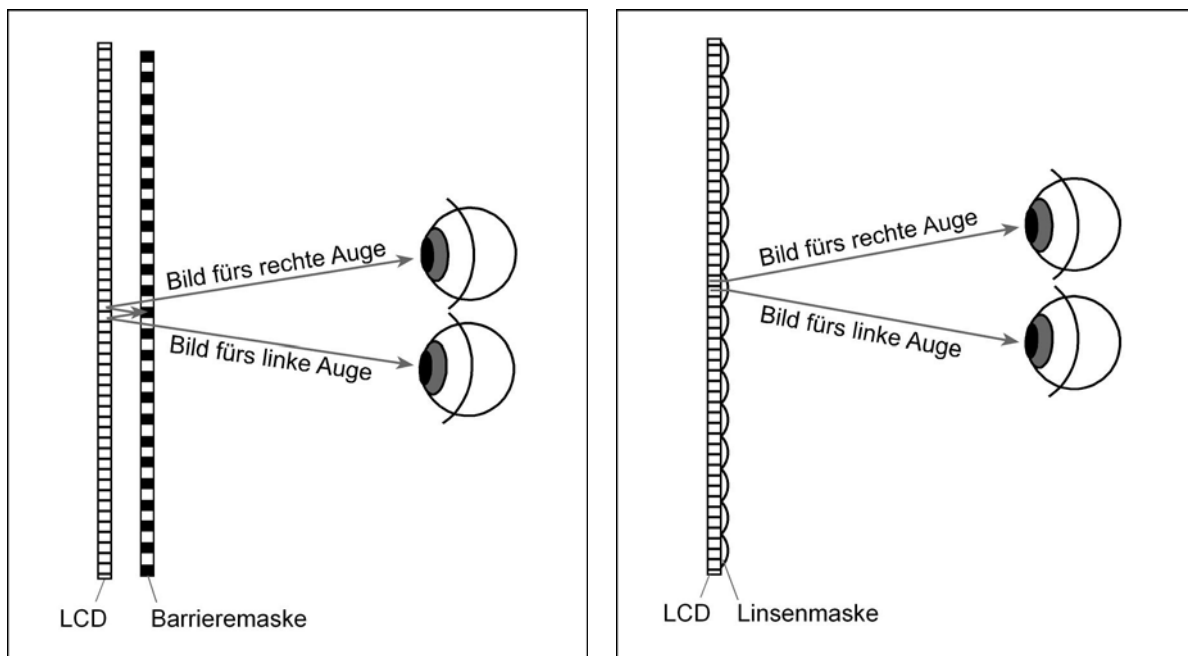
Wie im Vorangegangenen ausgeführt können weitere Bedingungen für die Anwendung von stereoskopischen Anzeigen in Fahrzeugen formuliert werden:

- Wenn monokulare Tiefenkriterien und visuelle Hilfsmittel nicht eingesetzt werden können oder zur Minimierung der Ablenkungswirkung nicht eingesetzt werden sollen;
- Wenn Informationen (z.B. Warnungen) hervorgehoben werden sollen und
- Wenn die Attraktivität von 3D-Anzeigen gesteigert werden soll.

Unter welchen Bedingungen sich bei einer Verwendung von (auto)stereoskopischen Anzeigen in Fahrzeugen tatsächlich Vorteile gegenüber monoskopischen 3D-Anzeigen nachweisen lassen, wird in den Experimenten 1, 2 und 5 empirisch untersucht.

### 5.4.2 Technologien stereoskopischer Anzeigen

In stereoskopischen Anzeigen werden mit Hilfe unterschiedlicher Technologien beiden Augen abweichende Bilder dargeboten. Die bekanntesten sind Stereoskope, Rot-Grün-Brillen, Polarisationsbrillen, Shutterbrillen, Hologramme und volumetrische Displays (Ausführliche Übersichten in Bowman et al., 2004; Hammer, 1998; Pastoor, 2005; Sexton & Surman, 1999). Im Fahrzeug sind aus Gründen der Kundenakzeptanz lediglich Verfahren ohne Sehhilfen einsetzbar. Außerdem muss sich der Bildschirminhalt mit geringem technischen Aufwand dynamisch verändern lassen. In den letzten 10 Jahren wurden autostereoskopische Displays (ASD) mit Barrieren- und Linsenmasken entwickelt, welche die genannten Kriterien erfüllen. Das Funktionsprinzip der ASD ist in Abbildung 5-2 dargestellt und die wichtigsten Eigenschaften sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.



Prinzip der Barrierenmasken

Prinzip der Linsenmasken

#### Abbildung 5-2: Funktionsprinzipien autostereoskopischer Displays (ASD)

Die Technologie der Barrierenmasken wurde für den Einsatz in Fahrzeugen zunächst als besonders erfolgversprechend angesehen, weil sich damit mehrere Ansichten – d.h. ein größerer Bewegungsbereich des Fahrers vor dem Bildschirm – einfach umsetzen lassen. Außerdem ist diese Technologie robust, kostengünstig und ermöglicht eine flexible Umschaltung zwischen 2D- und 3D-Modus. Gegen ASD mit Barrierenmasken und mehreren Ansichten sprechen deren geringere Auflösung, Helligkeit und Tiefenwirkung sowie die sichtbare Maskenstruktur und das stärkere Übersprechen der Ansichten (*crosstalk*). Um die Wirkung dieser negativen Effekte einschätzen zu können, wird in Experiment 1 ein 8-Ansichten-ASD mit Barrierenmaske mit einem

Shutterbrillensystem verglichen. Shutterbrillen stellen eine sinnvolle Referenz für hochwertige stereoskopische Anzeigen dar, die zudem einfach umsetzbar, robust und kostengünstig sind. Seit Mitte der 80er Jahre in Entwicklung befindlich erlauben sie einen sehr guten Tiefeneindruck bei 100%iger Auflösung und guter Helligkeit. ASD mit Linsenmasken erlauben zwar brillantere Anzeigen als ASD mit Barrierenmasken, sind aber nur mit Hilfe einer Erfassung der Kopfposition (*Headtracking*) in einem größeren Bewegungsbereich nutzbar. Sowohl die Umsetzung des Headtracking als auch die mechanische Nachführung der Linsenmaske sind sehr aufwändig. Es gibt Anzeichen dafür, dass aktuelle ASD (Hutarew et al., 2004; Quante & Hopf, 2003) und volumetrische Displays (Grossman & Balakrishnan, 2006) noch nicht die stereoskopische Anzeigequalität von Shutter- oder Polarisationsbrillen erreichen.

**Tabelle 5-2: Vergleich stereoskopischer Anzeigetechnologien**

	<b>Barrierenmasken</b>	<b>Linsenmasken Prismenmasken</b>	<b>Shutterbrille</b>
<b>Prinzip</b>	Filter (Folie oder Streifen-LCD) absorbiert die Information, die für das jeweilige Auge nicht bestimmt ist	Streifenlinsen oder Prismen brechen das Licht unterschiedlich und lenken die Infos zum jeweiligen Auge	Display zeigt abwechselnd Halbbilder. Brille aus LCD-Displays gibt Blick für jeweiliges Auge frei
<b>Sehhilfe</b>	Nein	Nein	Ja
<b>Auflösung</b>	1 / Anzahl Ansichten	50%	100%
<b>Helligkeit</b>	Reduziert durch Absorptionsmaske	Sehr gut	Reduziert durch Brille
<b>Tiefe &amp; Tiefenunterschied</b>	Gut	Sehr gut	Sehr gut
<b>Bewegungsbereich</b>	Mehrere Ansichten einfach umsetzbar, dann Bewegungsbereich i.O.; bei Headtracking wird Maske elektron. nachgeführt	Mehrere Ansichten aufwändig umsetzbar; bei Headtracking wird Maske mech. nachgeführt. Elektron. Verfahren in Entwicklung	Wegen Brille i.O.
<b>Umschaltung 2D/3D</b>	Ja, bei Streifen-LCD	Ja, z.T. mit halber Auflösung. Prototypen für 100% Auflösung	Ja
<b>Negative Wahrnehmungseffekte</b>	Maske sichtbar, wenn Pixel > 1 Bogenminute; crosstalk hier am stärksten	Pixel erscheinen rechteckig, wenn > 1 Bogenminute	Bei größeren Bewegungen unnatürliche Scheinbewegung im Display; Flackern bei Neonlicht
<b>Aufwand &amp; Kosten</b>	Robust und kostengünstig	Wegen mechanischer Lösung weniger flexibel, robust und kostengünstig	Robust und kostengünstig

### 5.4.3 Maßeinheiten und Stereoparameter

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Maßeinheiten und Stereoparameter erläutert, die in dieser Arbeit verwendet werden. Die Disparität wird in Stereodisplays üblicherweise als Abweichung zwischen den Bildern in Längeneinheiten angegeben (*Parallaxe*) und wird in Grad Sehwinkel mit folgender Formel umgerechnet:  $r \text{ (in Grad)} = 57.3 * s / D$  mit  $r$  als Disparität in Seh winkeln,  $s$  als Parallaxe in cm und  $D$  als Distanz des Betrachters zum Display (Cormack & Fox, 1985; Graham, 1965 in Patterson & Martin, 1992). Die stereoskopische Tiefenwirkung  $X$  wird auf der Grundlage geometrischer Überlegungen vorhergesagt:  $X = D * s / (i - s)$  (für ungekreuzte Disparitäten) und  $X = D * s / (i + s)$  (für gekreuzte Disparitäten) mit  $i = 6.4 \text{ cm}$  als Augenabstand (Cormack & Fox, 1985 in Patterson & Martin, 1992). Die Stereoparameter einer 3D-Szene sind im Anzeigeprogramm DBView über zwei der drei Größen Stereokameraabstand  $t$  (*eyedistance*), Stereokamerawinkel  $\beta$  (*eye-angle*) und Konvergenzdistanz  $L$  (*focal distance*) eindeutig festgelegt. Die drei Größen sind miteinander verknüpft:  $\tan \beta = t / 2L$ . In der Konvergenzdistanz haben alle Punkte die Disparität Null und erscheinen in der Bildelebene. Gekreuzte Disparitäten werden mit negativen Vorzeichen versehen, ungekreuzte mit positiven. Die Stereoparameter werden in dieser Arbeit für alle 3D-Anzeigen so festgelegt, dass in der Nähe der Bildelebene eine formtreue stereoskopische Darstellung gewährleistet ist (Woods, Docherty & Koch, 1993). Wenn der Kameraöffnungswinkel dem Blickwinkel des Betrachters auf die Szene entspricht, ist die stereoskopische Darstellung in der gesamten Szene formtreu und räumliche Urteile sind einfacher zu fällen (Banton, Thompson & Quinlan, 2001).

### 5.4.4 Gestaltungshinweise für stereoskopische Anzeigen

In stereoskopischen Anzeigen können Wahrnehmungsprobleme auftreten, die die Tiefenwahrnehmung erschweren und den visuellen Komfort reduzieren. Im Folgenden werden die Probleme beschrieben, welche im Zusammenhang mit den in Fahrzeugen verwendbaren ASD mit Barrieren- oder Linsenmasken zu beachten sind. Umfassende Überblicksdarstellungen finden sich bei Ijsselsteijn et al. (2005), Kooi & Toet (2004), Ware (2004), Pastoor (1993) und Hsu et al. (1996). Aus den Wahrnehmungsproblemen mit stereoskopischen Anzeigen werden Gestaltungshinweise für ASD in Fahrzeugen abgeleitet.

Einige Nutzer berichten, dass sie beim Betrachten der ASD eine Latenzzeit benötigen, ehe sie einen Tiefeneffekt erleben. Möglicherweise stellt sich die binokuläre Fusion in stereoskopischen Anzeigen langsamer ein als in der natürlichen Umwelt. In mehreren Studien wurde nachgewiesen, dass die Darbietungsdauer einen Einfluss darauf hat, ob Betrachter stereoskopische



Tiefe diskriminieren können (Marrara & Moore, 2000; Patterson & Fox, 1984; Tam & Stelmach, 1998) und wie exakt die stereoskopische Tiefenwahrnehmung den geometrischen Vorhersagen entspricht (Patterson, Moe & Hewitt, 1992). Bei einer Darbietungsdauer von 20 ms waren 50% der Probanden nicht in der Lage, stereoskopisch zu sehen, wohingegen es nach einer Sekunde nur noch 5% waren (Tam & Stelmach, 1998). Da Blickwechsel zu stereoskopischen Anzeigen während der Fahrt häufig vorkommen, könnte dieser Effekt alle potenziellen Stereo-Vorteile aufheben. In Experiment 1 wird deshalb der Effekt der stereoskopischen Latenz untersucht.

Ferner treten Doppelbilder in stereoskopischen Anzeigen häufiger auf als in der natürlichen Tiefenwahrnehmung, da in den Anzeigen die Bildschärfe nicht mit zunehmender Exzentrizität zur Fixation abnimmt, Asymmetrien zwischen den Halbbildern bestehen (z.B. in Helligkeit, Farbe, Auflösung, Größe, Orientierung) oder die Bilder widersprechen (*crossstalk*). Wenn der Bildschirmrahmen ein virtuelles Objekt berührt oder verdeckt, zerfällt die binokuläre Fusion (*frame cancellation*: Valyus, 1962) und wenn der Bildschirmrahmen sich zu sehr von der Anzeige abhebt oder sich Verunreinigungen auf der Bildschirmoberfläche befinden, leidet der stereoskopische Tiefeneindruck ebenfalls (*cues to flatness*: Braunstein, 1976 in Wickens et al., 1989). Durch die Aufhebung der Kopplung von Konvergenz und Akkomodation werden zudem Einbußen im visuellen Komfort hervorgerufen (Kooi & Toet, 2004; Mon-Williams & Wann, 1998; Wann, Rushton & Mon-Williams, 1995), d.h. die Augen konvergieren auf die stereoskopische Tiefe eines Objektes, aber sie akkomodieren auf die Bildschirmoberfläche. Inzwischen gibt es Technologien, die das Ungleichgewicht von Konvergenz und Akkomodation beseitigen (Pastoor, 2005; Schowengerdt & Seibel, 2004).

Insgesamt müssen folgende Gestaltungshinweise für ASD in Fahrzeugen beachtet werden:

- Da stereoskopische Anzeigen nicht für Anwendungsszenarien mit mehreren Betrachtern und schrägen Blickwinkeln geeignet sind, sollten sie so platziert werden, dass sie entweder nur vom Fahrer oder nur vom Beifahrer eingesehen werden können.
- Um Doppelbilder zu reduzieren und den visuellen Komfort zu erhöhen, sollte die Tiefenwirkung auf kleinen ASD auf ca. 20 cm ungekreuzte und ca. 5 cm gekreuzte Disparität beschränkt werden. Das entspricht bei einem Betrachterabstand von 80 cm einer Disparität von 60 Bogenminuten bzw. einer Parallaxe von 1.4 cm (vgl. 1.5°-Regel: Valyus, 1962). Da Szenen der Fahrzeugumgebung eine deutlich größere Tiefe besitzen, muss die Disparität der virtuellen Szenen komprimiert werden. Dies geschieht zum einen

automatisch, wenn die virtuelle Szene an die Displaygröße angepasst wird. Zum anderen kann der Abstand der virtuellen Stereokameras kleiner als der Augenabstand gewählt werden (Ware, 2004). Somit können zwar absolute Distanzen der realen Umgebung auch in stereoskopischen Anzeigen nur mit Hilfe von Skalen geschätzt werden, aber relative Distanzurteile sind weiterhin problemlos möglich (Ware, 2004).

- Gekreuzte Disparitäten zwischen Bildschirmenebene und Betrachter sollten vermieden bzw. auf bis zu 5 cm Tiefeneindruck beschränkt werden, da im Fahrzeug große Lichtstärken und häufige Wechsel der Lichtbedingungen auftreten. Durch ungekreuzte Disparitäten lässt sich zudem eine frame cancellation weitestgehend verhindern.
- Stereodisplays sollten eine deutlich höhere Auflösung haben als konventionelle. Bei der üblichen Pixelgröße von 0.4 mm und einer maximal sinnvollen Disparität von 1.4 cm sind lediglich 35 Abstufungen der stereoskopischen Tiefe möglich. Zudem halbiert sich die Auflösung auf ASD mit zwei Ansichten.
- Wenn der Stereoeffekt trotz Kopfbewegungen nicht verloren gehen bzw. nicht mit einem Ruckeln in das nächste Halbbild übergehen soll, müssen mehr Ansichten umgesetzt oder eine Kopplung mit einem Headtracking vorgenommen werden.
- Die virtuelle Szene sollte so gestaltet sein, dass größere Disparitäten leicht fusioniert werden. Unregelmäßige Texturen mit kleinen Helligkeits- oder Farbtonunterschieden unterstützen den stereoskopischen Tiefeneindruck, wohingegen regelmäßige Streifentexturen systematische Fehler erzeugen (Thomas, Goldberg, Cannon & Hillis, 2002). Durch zu starke Kontraste an Objektübergängen entstehen Doppelbilder (Pastoor, 1993).
- Um eine bestmögliche Unterstützung von Tiefenurteilen zu gewährleisten, sollte in stereoskopischen 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme die Fahrerperspektive verwendet werden. Mit zunehmendem Höhenwinkel verteilt sich die stereoskopische Disparität auf die Dimensionen Tiefe und Höhe (Gleichverteilung bei 45°), sodass ab ca. 20° keine Stereo-Vorteile für die Tiefenurteile mehr zu erwarten sind.

#### **5.4.5 Fazit**

Um gesicherte Aussagen zum Nutzen und zu den Grenzen einer Verwendung autostereoskopischer Anzeigen in Fahrzeugen treffen zu können, werden folgende Fragestellungen im empirischen Teil dieser Arbeit untersucht:

Zum Nutzen:

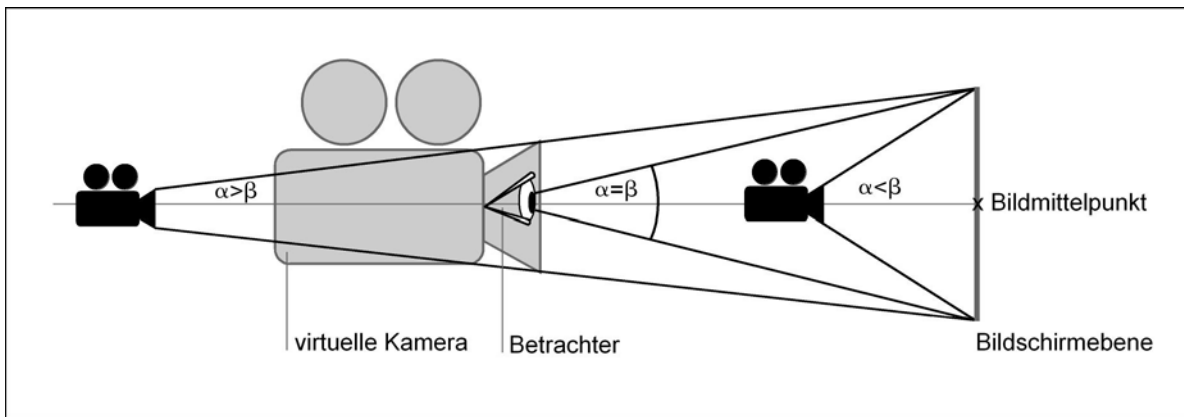
- **Experiment 1, 2 und 5:** Welchen zusätzlichen Nutzen für die Tiefenwahrnehmung bringt die (auto)stereoskopische Darbietung einer 3D-Anzeige?
- **Experiment 2:** Verbessert eine stereoskopische Darstellung die Tiefenwahrnehmung, wenn keine visuellen Hilfsmittel enthalten sind?
- **Experiment 2 und 5:** Verbessert eine (auto)stereoskopische Darstellung die Tiefenwahrnehmung, wenn Perspektiven mit einer geringen Auflösung der Tiefe verwendet werden?
- **Experiment 1, 2, 5:** Werden (auto)stereoskopische 3D-Anzeigen subjektiv als nützlicher und attraktiver bewertet als monoskopische 3D-Anzeigen?

Zu den Grenzen:

- **Experiment 1 und 5:** Erreichen aktuelle ASD bereits die Qualität stereoskopischer Darstellungen mit Shutterbrille?
- **Experiment 1 und 5:** Zeigen sich mit ASD negative Wahrnehmungseffekte im Vergleich zu konventionellen Displays?
- **Experiment 1:** Gibt es bei der Verwendung von (auto)stereoskopischen Anzeigen eine stereoskopische Latenz?
- **Experiment 5:** Welchen Einfluss hat die autostereoskopische Darbietung einer 3D-Anzeige auf die Ablenkungswirkung während der Fahrt?

## 5.5 Geometrische Parameter einer virtuellen 3D-Szene

Bei der Gestaltung einer virtuellen 3D-Szene werden die Parameter der virtuellen Kamera sowie die Größenverhältnisse und Distanzen der Objekte im Vergleich zur Realität festgelegt. Des Weiteren sind geometrische Hilfsmittel wie z.B. eine künstliche Übertreibung der Vertikalen relativ zur Horizontalen und andere Formveränderungen einsetzbar. Bei der Auswahl der geometrischen Parameter geht es weniger um eine Kopie der Realität als um eine sinnvolle Gestaltung, die alle wichtigen Informationen angemessen vermittelt, ohne unnötige Wahrnehmungsfehler zu provozieren (Ellis, 2000).



**Abbildung 5-3: Parameter der virtuellen Kamera**

Mit  $\alpha$  = Blickwinkel des Betrachters und  $\beta$  = Kameraöffnungswinkel.

Die **Parameter der virtuellen Kamera** beeinflussen das Erscheinungsbild einer Anzeige und damit die räumliche Tiefenwahrnehmung (Übersichten in Banton et al., 2001; Ellis, 2000; McGreevy & Ellis, 1986; Wickens et al., 1989). Die virtuelle Kamera kann mit einer realen Kamera verglichen werden. Die Position der virtuellen Kamera ergibt sich aus dem Abstand und der Kombination aus Azimut- und Höhenwinkel, mit der die Kamera zum Bildmittelpunkt gerichtet ist (s. auch Abb. 2-1). Mit größer werdendem Abstand zum Bildmittelpunkt erscheint die Szene kleiner. Die Kombination aus Azimut- und Höhenwinkel bzw. der Blickwinkel der Kamera auf die Szene ist gleichzusetzen mit der Perspektive. Der Kameraöffnungswinkel  $\beta$  ist mit dem Objektiv einer Kamera gleichzusetzen (s. Abb. 5-3). Eine Szene wird unverzerrt wahrgenommen, wenn der Erwartung des Betrachters entsprochen wird, d.h. dass der Kameraöffnungswinkel  $\beta$  mit dem Blickwinkel des Betrachters  $\alpha$  auf die Anzeige übereinstimmt (McGreevy & Ellis, 1986). Der Blickwinkel des Betrachters  $\alpha$  ergibt sich aus der Anzeigengröße und aus der Distanz zwischen Betrachter und Anzeige. Bei Abweichungen entstehen unerwünschte Wahrnehmungseffekte, die Höhen- und Tiefenurteile beeinträchtigen (Banton et al., 2001; Barfield & Kim, 1991; McGreevy & Ellis, 1986), wenn auch nicht in besonders starkem Maße (McGreevy & Ellis, 1986). Da Abweichungen kleiner  $30^\circ$  keine signifikanten Einbußen hervorrufen (Banton et al., 2001; Rosenberg & Barfield, 1995), können diese eingesetzt werden, um das Erscheinungsbild einer Szene gezielt zu verändern. Mit Hilfe eines Kameraöffnungswinkels, der größer als der Blickwinkel des Betrachters auf die Anzeige ist (= Effekt Weitwinkelobjektiv), wird ein größerer Teil der Szene in der Anzeige abgebildet. Die Anzeigenelemente sind dann dichter angeordnet und konvergieren stärker bei großen Distanzen, sodass die Szene insgesamt optisch gedehnt erscheint. Mit einem kleineren Kameraöffnungswinkel (= Effekt Teleobjektiv) wird der entgegengerichtete Effekt erzielt.

Die Skalierung der **Objektgrößen und Distanzen** ist insbesondere dann von Interesse, wenn reale Szenen - wie z.B. die Fahrzeugumgebung - auf einer Anzeige virtuell nachgebildet werden. Anzeigen von Menüsystemen werden hingegen losgelöst von Größenverhältnissen in der Realität gestaltet. Eine lineare Skalierung der Größen und Distanzen tiefer Szenen auf die Größenverhältnisse von Fahrzeugdisplays mit ca. 8 Zoll hat zur Folge, dass Objekte schon bei geringen Distanzen nicht mehr zu erkennen sind. Eine künstliche Vergrößerung der Objekte bzw. die Verkürzung von Distanzen bedeutet hingegen, dass absolute Distanzen in der Realität anhand der Objektgrößen und Distanzen in der Anzeige nicht geschätzt werden können. Das ist jedoch nicht ausschlaggebend, da in vielen Anzeigen gar keine absoluten Distanzen geschätzt werden müssen (z.B. Abstandsregeltempomat) und dies in stark verkleinerten Anzeigen ohne einen Maßstab (z.B. einer 2D-Navigationskarte) sowieso nicht ausführbar ist. Barfield et al. (1995) empfehlen, die Objekte so stark zu vergrößern, dass sie auf jeden Fall als künstlich vergrößert wahrgenommen und deshalb nicht fälschlicherweise zu absoluten Distanzschätzungen herangezogen werden. Außerdem kann es sinnvoll sein, nicht alle Objekte gleichermaßen, sondern ausgewählte Objekte oder Distanzen in nur einer oder zwei Dimensionen relativ zu vergrößern, um bestimmte Informationen oder Veränderungen hervorzuheben.

**Fazit.** In den 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten werden der Abstand der Kamera zum Bildmittelpunkt und der Kameraöffnungswinkel so umgesetzt, dass ein Kompromiss zwischen geringen Abweichungen vom Blickwinkel des Betrachters auf die Anzeige und einem optimalen Erscheinungsbild der Anzeige gewährleistet ist. Die Größen der Fahrzeuge bzw. die Distanzen werden so angepasst, dass sie in der Anzeige gut zu erkennen sind. Da es zu den geometrischen Parametern für die Gestaltung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen keine spezifischen offenen Fragen gab, werden hierzu keine Experimente durchgeführt.

## 5.6 Perspektive

Als Perspektive wird in dieser Arbeit die Kombination von Azimut- und Höhenwinkel in einer 3D-Anzeige bezeichnet, die dem Blickwinkel der virtuellen Kamera auf den Bildmittelpunkt entspricht (s. Abb. 2-1). Nachdem in Abschnitt 3.1.3 der Zusammenhang zwischen dem Bezugsrahmen einer Aufgabe und der Perspektive grundsätzlich erläutert und in Abschnitt 5.5 die geometrischen Parameter einer virtuellen 3D-Szene aufgeführt wurden, werden in diesem Abschnitt konkrete Empfehlungen für die Auswahl von Azimut- und Höhenwinkeln für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen hergeleitet.

Für Aufgaben, die in einem exozentrischen Bezugsrahmen ausgeführt werden und somit keinen Abgleich zwischen einer Anzeige und der Umgebung erfordern, kann die Wahl der Perspektive der Anzeige davon abhängig gemacht werden, welche räumlichen Informationen mit bester Auflösung abgebildet werden sollen. Dies trifft beispielsweise auf Anzeigen von Navigationskarten zur Routenplanung und von Menüsystemen zu. In Aufgaben mit egozentrischem Bezugsrahmen konkurrieren die Anforderungen der Auflösung in der Tiefe und des Abgleichs zwischen Anzeige und Umgebung.

In einer **Aufgabe ohne Abgleich** von Anzeige und Umgebung (exozentrischer Bezugsrahmen) ist die Auflösung der räumlichen Informationen, d.h. die Länge der Abbildung einer Strecke im Verhältnis zu ihrer wahren Länge, das Kriterium für die Auswahl der Perspektive. Je kleiner der Höhenwinkel und je intensiver damit die perspektivische Wirkung ist, desto stärker fällt die Verkürzung in der Tiefe aus und desto schwächer in der Höhe. Deshalb garantieren Höhenwinkel zwischen  $45^\circ$  und  $90^\circ$  verlässliche Tiefenurteile (Barfield, Rosenberg et al., 1995; Smallman et al., 2002; Yeh & Silverstein, 1992) und Höhenwinkel kleiner als  $45^\circ$  verlässliche Höhenurteile (Barfield & Rosenberg, 1995; Hendrix & Barfield, 1997; Yeh & Silverstein, 1992). Wenn horizontale und vertikale Informationen gleich wichtig sind, stellt erwartungsgemäß ein Höhenwinkel von  $45^\circ$  den besten Kompromiss dar (Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987). Mathematisch lässt sich bei einem Azimutwinkel von  $0^\circ$  die Auflösung einer Strecke in der Tiefe mit dem Sinus und die Auflösung in der Höhe mit dem Kosinus des Höhenwinkels beschreiben (Hickox & Wickens, 1999). Das bedeutet, dass die Auflösung in der Tiefe mit größer werdendem Höhenwinkel nicht linear zunimmt, sondern bei kleinen Höhenwinkeln ( $< 45^\circ$ ) steil und bei großen ( $> 45^\circ$ ) nur noch flach ansteigt. Ferner wächst die Verkürzung in der Tiefe mit zunehmender Entfernung nicht linear, sondern quadratisch (Gillam, 1981, 1995 in Smallman et al., 2003).

Je größer der Azimutwinkel, desto niedriger ist die Auflösung in der Breite, aber desto höher ist die Auflösung in der Tiefe (Häring, 2004; Wickens et al., 1996). Bei Azimutwinkeln  $\neq 0^\circ$  ergibt sich die Auflösung in der Tiefe als  $a = (\sin \alpha * \cos \beta)^2 + (\sin \beta)^2$ , wobei  $a$  für die Auflösung der Strecke,  $\alpha$  für den Höhenwinkel und  $\beta$  für den Azimutwinkel stehen (vgl. Häring, 2004). Bei kleinen Höhenwinkeln ( $< 45^\circ$ ) ist der Zuwachs an Auflösung in der Tiefe durch die gleiche Azimutrotation deshalb stärker als bei großen ( $> 45^\circ$ ). Nur wenn sowohl Höhen- als auch Azimutwinkel einen Wert ungleich der vier kardinalen Richtungen einnehmen, sind drei Seiten eines 3D-Objektes sichtbar und es wird besser erkennbar. Sobald Höhen- und Azimutwinkel  $45^\circ$  betragen, ist die Auflösung in der Tiefe, Breite und Höhe gleichmäßig verteilt.

In einer **Aufgabe mit Abgleich** von Anzeige und Umgebung (egozentrischer Bezugsrahmen) müssen die Anforderungen der horizontalen Auflösung und des Abgleichs zwischen Anzeige und Umgebung zu einem Kompromiss geführt werden. Da in FAS-Anzeigen insbesondere horizontale Informationen wichtig sind, garantieren Höhenwinkel größer als  $45^\circ$  (Barfield, Rosenberg et al., 1995; Yeh & Silverstein, 1992) ausreichend verlässliche Tiefenurteile, ohne dass Höheninformationen - und damit der 3D-Eindruck - verloren gehen. Ein Azimutwinkel von  $0^\circ$  ergibt eine optimale Auflösung in der Breite.

Einen einfachen Abgleich sichern Höhen- und Azimutwinkel, die möglichst wenig von der egozentrischen Fahrerperspektive abweichen (s. Abschn. 3.1.3). Bei der Ausführung eines Kartenabgleichs in Flugzeugen zeigten sich aber erst ab Höhenwinkelunterschieden von ca.  $30^\circ$  (Goldberg et al., 1992; Hickox & Wickens, 1999; Schreiber et al., 1998) negative Auswirkungen auf die Leistung, sodass - übertragen auf die Fahrerperspektive von ca.  $10^\circ$  Höhenwinkel - Höhenwinkel zwischen  $10^\circ$  und  $40^\circ$  einen einfachen Abgleich sichern dürften. Obwohl die meisten Autoren empfehlen, den Azimutwinkel dynamisch mit dem Blickwinkel des Fahrers zu rotieren, fanden sich signifikante Leistungseinbußen erst ab einer Azimutrotation von  $22^\circ$  (Schreiber et al., 1998), von  $45^\circ$  (Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Wickens et al., 1996; Wickens & Prevett, 1995) bzw. von  $70^\circ$  (Brown & Gallimore, 1995). Deshalb könnte ein Azimutwinkel ungleich  $0^\circ$  auch in Fahrzeuganzeigen zur Steigerung der Auflösung in der Tiefe insbesondere bei flachen Höhenwinkeln und zur besseren Erkennbarkeit von 3D-Objekten eingesetzt werden.

Den besten Kompromiss zwischen verlässlichen Tiefenurteilen und einfachem Abgleich mit der Außensicht ermöglichen im Flugführungskontext Höhenwinkel zwischen  $45^\circ$  und nahezu  $90^\circ$ , je nachdem, wie wichtig horizontale oder vertikale Informationen für die Aufgabenlösung sind (Goldberg et al., 1992; Hickox & Wickens, 1999; Schreiber et al., 1998). Im Fahrzeugkontext wird der Kompromiss mit großer Wahrscheinlichkeit zur Wahl kleinerer Höhenwinkel führen, da die Perspektive des Fahrers wesentlich flacher ist als die eines Piloten. Dadurch wird jedoch die Forderung nach einer akzeptablen horizontalen Auflösung in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen nicht so leicht zu erfüllen sein wie in Flugzeugen. Systematische Untersuchungen über ein breites Spektrum an Höhenwinkeln wurden im Fahrzeugkontext noch nicht durchgeführt. Der Verfasserin sind lediglich zwei Studien bekannt, in denen der Abgleich zwischen Fahrszenen und Kreuzungsdarstellungen untersucht wurde. Green und Williams (1992) ließen ihre Probanden an die Wand projizierte Fotografien von Fahrsituationen (Fahrerperspektive) mit abstrakten Kreuzungsdarstellungen (Fahrerperspektive, Perspektive mit ca.  $45^\circ$  Höhenwinkel, 2D-Draufsicht) auf einem Display in einer Fahrzeugsitzkiste vergleichen und entscheiden, ob

es sich um die gleichen oder um unterschiedliche Situationen handelte. Bei Heller et al. (2003) verglichen die Probanden statische und dynamische Computersimulationen von Fahrsituationen (Fahrerperspektive) mit schematischen Abbiegepfeilen (Fahrerperspektive, 2D-Draufsicht) auf einem PC-Monitor. In beiden Untersuchungen lieferten die Anzeigen aus der Fahrerperspektive die langsamsten und ungenauesten Reaktionen. Diese Ergebnisse wurden damit begründet, dass durch den flachen Höhenwinkel der Fahrerperspektive die Verkürzung in der Tiefe so stark war, dass die wesentlichen Merkmale von Kreuzungsdarstellungen nicht mehr so gut zu erkennen waren wie in der 2D-Draufsicht. Ein Höhenwinkel von ca. 45° erbrachte bei Green & Williams (1992) geringfügig – wenn auch nicht signifikant – schnellere und genauere Reaktionen als die 2D-Draufsicht und zeigt damit das Potenzial von 3D-Anzeigen mit geeigneten Höhenwinkeln für eine Verbesserung des Abgleichs. Da insgesamt selbst bei Aufgaben mit Abgleich die Nachteile der Verkürzung in der Tiefe durch die Fahrerperspektive überwogen, obwohl wirklich nur grobe Tiefenurteile gefordert waren, wird für Anzeigen in Fahrzeugen eine moderate Vergrößerung des Höhenwinkels im Vergleich zur Fahrerperspektive generell empfohlen. Ein größerer Höhenwinkel beinhaltet zudem den Vorteil, dem Fahrer mehr Informationen und eine größere Übersicht über die Fahrzeugumgebung anzubieten. Aus den vorliegenden Ergebnissen wird die Wahl eines Höhenwinkels für Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen auf einen Bereich zwischen 20° und 45° eingegrenzt.

Der exakte Höhenwinkel der Fahrerperspektive kann dann sinnvoll sein, wenn eine 3D-Anzeige stereoskopisch dargeboten wird. Empirische Befunde zeigen, dass durch eine stereoskopische Darbietung die Auflösungs Nachteile flacher Höhenwinkel ausgeglichen werden können (Barfield & Rosenberg, 1995; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Yeh & Silverstein, 1992). Außerdem kann eine stereoskopische Anzeige in der Fahrerperspektive Attraktivitätsvorteile haben, weil so die natürlichen Wahrnehmungsbedingungen am exaktesten nachgebildet werden.

Grundsätzlich sollten eine oder mehrere optimale Perspektiven angeboten werden, da die Einstellung einer geeigneten Perspektive durch den Fahrer Zeit, kognitive Ressourcen und Erfahrung mit 3D-Anwendungen erfordert. Es verwundert deshalb nicht, dass 3D-Anzeigen keine Vorteile erbrachten, wenn die Nutzer die Perspektive selbst einstellen mussten (Park & Woldstad, 2000; van Orden & Broyles, 2000). Kombinationen aus 3D-Anzeigen unterschiedlicher Perspektiven (Aretz, 1991; Olmos et al., 2000) oder aus 2D- und 3D-Anzeigen (St. John, Smallman, Bank & Cowen, 2001; Tory, Kirkpatrick, Atkins & Möller, 2006) können Vorteile erbringen, wenn der Nutzer verschiedene Aufgaben mit der Anzeige ausführt (z.B. räumliches Verständnis und



präzise räumliche Urteile), erhöhen aber die visuelle Komplexität. Ergänzende Übersichtsdarstellungen aus einer festen Perspektive können die Orientierung und Navigation in 3D-Anzeigen erleichtern (Clockwise Technologies Ltd., 2001; Haik, Barker, Sapsford & Trainis, 2002; Robertson et al., 2000).

**Fazit.** Aus zwei Gründen wurde die Wahl der Perspektive in 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme am Beispiel des Abstandsregeltempomaten in den Experimenten 2, 4 und 5 untersucht. Erstens sind bisher keine empirischen Untersuchungen verfügbar, die den Kompromiss zwischen der Auflösung in der Tiefe und dem Abgleich für eine Anwendung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen anhand eines breiten Spektrums an Höhen- und Azimutwinkeln systematisch untersuchen. Zweitens bestimmt die richtige Wahl des Höhen- und Azimutwinkels, ob sich der 3D-Vorteil der räumlichen Kompatibilität überhaupt zeigen kann und sollte deshalb mit größter Sorgfalt getroffen werden. Aus den verfügbaren empirischen Befunden wurde die Wahl der Perspektive für 3D-Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen im Vorfeld der Experimente in dieser Arbeit auf einen Höhenwinkel zwischen  $20^\circ$  und  $45^\circ$  und einen Azimutwinkel zwischen  $0^\circ$  und  $45^\circ$  eingegrenzt.

Im Einzelnen werden folgende offene Fragen zur Auswahl der Perspektive untersucht:

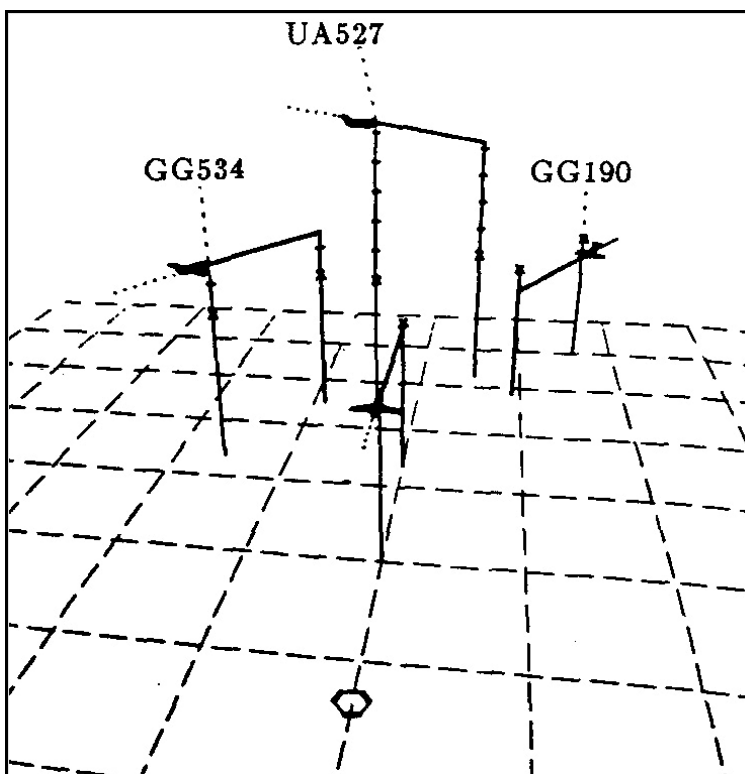
- **Experiment 2:** Welchen Einfluss hat die Auflösung in der Tiefe auf die Tiefenwahrnehmung in einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten?
- **Experiment 2 und 5:** Sind eine Azimutrotation von  $45^\circ$  (Exp. 2), visuelle Hilfsmittel (Exp. 2) oder eine stereoskopische Darstellung (Exp. 2 und 5) in der Lage, die Tiefenwahrnehmung in Perspektiven mit einer geringen Auflösung in der Tiefe zu verbessern?
- **Experiment 4:** Welcher Kompromiss zwischen der Auflösung in der Tiefe und dem Abgleich von Außensicht und Anzeige (räumliche Kompatibilität) ergibt sich für die 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten?
- **Experiment 2, 3, 4 und 5:** Welche Perspektiven werden subjektiv als nützlicher und attraktiver bewertet?

## 5.7 Visuelle Hilfsmittel

Selbst wenn in 3D-Anzeigen aus Gründen der technischen Machbarkeit und des technischen Aufwandes weniger Tiefenkriterien und Objekte enthalten sind als in der natürlichen Umwelt, so bieten diese die Möglichkeit, künstliche visuelle Hilfsmittel (*visual enhancements*) in eine Szene einzubringen, die die Tiefenwahrnehmung erleichtern und Wahrnehmungsfehler reduzieren.

Ein Beispiel für die Nutzung visueller Hilfsmittel ist eine 3D-Anzeige des umgebenden Flugverkehrs für Piloten von Ellis, McGreevy & Hitchcock (1987) mit Gitternetzlinien auf der Grundfläche, vertikalen Verbindungslinien zwischen den Flugzeugsymbolen und der Grundfläche, einer Markierung „x“ für die eigene Flughöhe an jeder Verbindungslinie, weiteren Skalenstrichen an den Verbindungslinien, die abweichende Flughöhen in Abschnitte von 1000 Fuß einteilen, Linien zur Anzeige des Flugweges der letzten 40 s und der nächsten 60 s und eine Angabe zum Flugnummer (s. Abb. 5-4).

Obwohl visuelle Hilfsmittel künstliche Zusätze in einer 3D-Anzeige sind, wirken sie wie normale Tiefenkriterien (vgl. Ware, 2004). Gitternetzlinien auf einer Fläche sind nichts anderes als eine regelmäßige Textur, welche horizontale und vertikale Distanzen in gleichmäßige Abschnitte unterteilt. Verbindungslinien zu einer Grundfläche oder zu den Achsen eines Koordinatensystems stellen - vergleichbar mit Schatten - den Kontakt zu den dort enthaltenen Tiefenkriterien Perspektive, Textur, relative Höhe und Größe her und unterstützen dadurch Tiefen- und Höhenurteile. Markierungen an Verbindungslinien erleichtern das Ablesen konkreter Werte wie Skaleneinteilungen in konventionellen 2D-Diagrammen. Zudem sollten Beschriftungen, Farb- und Helligkeitskodierungen und Skalen in 3D-Anzeigen die gleiche unterstützende Wirkung entfalten wie in 2D-Anzeigen.



**Abbildung 5-4: Beispiel einer Anzeige mit visuellen Hilfsmitteln**

Aus Ellis, McGreevy & Hitchcock (1987, S. 374). Erläuterungen im Text.

In zahlreichen Experimenten wurde festgestellt, dass visuelle Hilfsmittel räumliche Urteile (Barfield & Rosenberg, 1995; Ellis, Tharp, Grunwald & Smith, 1991; Hendrix & Barfield, 1997; Smallman et al., 2002) und Bedienhandlungen (Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Park & Woldstad, 2000) in 3D-Anzeigen verbessern. Ferner ist bei vielen 3D-Anzeigen nicht vorstellbar, dass sie ohne visuelle Hilfsmittel Vorteile gegenüber 2D-Anzeigen hätten erbringen können (z.B. McCormick et al., 1998; Wickens et al., 1994). Wickens et al. (1994) setzten im Gegensatz zu anderen Autoren (z.B. Barfield & Robless, 1989) Verbindungslinien zwischen einzelnen Datenpunkten und den Achsen eines 3D-Koordinatensystems ein und fanden Vorteile von 3D- gegenüber koplanaren 2D-Daten-Diagrammen. Darüber hinaus gibt es nur wenige Studien, die lediglich einen marginalen Nutzen von visuellen Hilfsmitteln aufzeigen (Alm et al., 2003; Liao & Johnson, 2004), und keine Studien, die explizite Kosten berichten. Da visuelle Hilfsmittel die visuelle Komplexität von Anzeigen erhöhen, sollten sie nur äußerst sparsam eingesetzt werden.

**Fazit:** Die Wirkung visueller Hilfsmittel wird in Experiment 2 untersucht:

- **Experiment 2:** Welchen Einfluss haben Distanzsegmente als visuelle Hilfsmittel auf die Tiefenwahrnehmung in einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten?
- **Experiment 2:** Sind die Distanzsegmente in der Lage, insbesondere die Nachteile von Perspektiven mit einer geringen Auflösung in der Tiefe auszugleichen?

## 6 Zusammenfassung und Fragestellungen

Die Diskussion der Gestaltungsparameter zeigt, dass es zahlreiche offene Fragen dazu gibt, wie 3D-Anzeigen in Fahrzeugen aussehen müssen, um einerseits einen möglichst eindeutigen und schnellen räumlichen Tiefeneindruck zu vermitteln und andererseits die Ablenkungswirkung nicht zu erhöhen. In den Experimenten 1 und 2 werden deshalb ausgewählte Gestaltungsaspekte von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen untersucht:

- **Experiment 1:** Am Beispiel eines Versuchsreizes, welcher Elemente einer Menüauswahl enthält, werden die Art und Anzahl der monokularen Tiefenkriterien, der Nutzen einer stereoskopischen Darbietung, Technologien stereoskopischer Anzeigen und die stereoskopische Latenz untersucht.
- **Experiment 2:** Am Beispiel einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten (ART) werden die Wahl einer geeigneten Perspektive, die Wirkung von Distanzsegmenten als visuelle Hilfsmittel und erneut der Nutzen einer stereoskopischen Darbietung untersucht.

Die Ergebnisse fließen in die Gestaltung der 3D-Anzeige des ART ein (s. Kap. 9). Erst dann können die vermuteten 3D-Vorteile zum Tragen kommen. Ausgewählte Fragen zur Gestaltung der Perspektive und zur Verwendung von ASD werden in den Experimenten 4 und 5 vertiefend untersucht.

Die wesentlichen Vorteile von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen werden in einem einfacheren Abgleich der Anzeige mit der Außensicht (Vorteil räumliche Kompatibilität), in einer Erhöhung des unmittelbaren Verständnisses der Anzeigeninhalte (Vorteil Bildhaftigkeit), in einer zusätzlichen Dimension zur Hervorhebung von Informationen (Vorteil Aufmerksamkeitslenkung) sowie in einer höheren Attraktivität/Akzeptanz bei den Kunden (Vorteil Attraktivität) gesehen. Am Beispiel einer 3D-Anzeige des ART wird in drei Experimenten überprüft, ob sich diese Vorteile tatsächlich einstellen. Der 3D-Vorteil der Aufmerksamkeitslenkung wird aus Aufwandsgründen hier nicht untersucht.

- **Experiment 3:** Am Beispiel einer 3D-Anzeige des ART werden die 3D-Vorteile Bildhaftigkeit und Attraktivität überprüft.
- **Experiment 4:** Am Beispiel einer 3D-Anzeige des ART werden die 3D-Vorteile räumliche Kompatibilität und Attraktivität überprüft.
- **Experiment 5:** Experiment 4 wird mit einem ASD repliziert.

Darüber hinaus wird in den **Experimenten 4 und 5** überprüft, ob monoskopische und autostereoskopische 3D-Anzeigen im Vergleich zu 2D-Anzeigen die Wahrnehmungssicherheit nicht beeinträchtigen und die Ablenkungswirkung nicht erhöhen.

## **7 Experiment 1 – Monokulare Tiefenkriterien und stereoskopische Disparität als Gestaltungsparameter**

### **7.1 Fragestellung und Hypothesen**

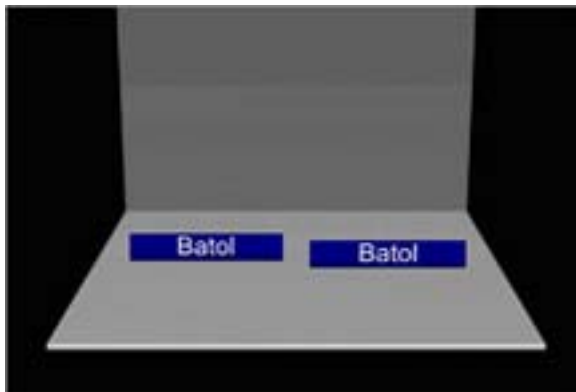
Die Bewertung verschiedener Tiefenkriterien hinsichtlich der Merkmale Wirkungsstärke, optimale Distanz, kleinster wahrnehmbarer Tiefenunterschied, Art der Tiefeninformation und technischer Aufwand führte zu einer Grundauswahl von Tiefenkriterien für eine Verwendung in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen (s. Abschn. 5.3.5). Die Tiefenkriterien relative Größe, relative Höhe, Perspektive und Helligkeit/Licht stellen vermutlich ein sinnvolles Minimum dar, um einen räumlichen Tiefeneindruck zu erzeugen. Mit ihrer Umsetzung sind lediglich ein geringer technischer Aufwand und eine geringe visuelle Komplexität der Anzeigen verbunden. Da es sich dabei aber nur um wenige Tiefenkriterien mit mittlerer Wirkungsstärke handelt, wurden die Tiefenkriterien Textur, Verdeckung, Schatten und stereoskopische Disparität in dieser Arbeit als Optionen angesehen, die Tiefenwahrnehmung in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen zu verbessern. Denn je mehr Tiefenkriterien in einer Anzeige enthalten sind, desto eindeutiger und schneller stellt sich der räumliche Tiefeneindruck ein (z.B. Künnapas, 1968; Mazur & Reising, 1990; Zenyuh et al., 1988). Da andererseits die Hinzunahme von Tiefenkriterien Kosten bezüglich einer Erhöhung der visuellen Komplexität und des technischen Aufwandes verursachen kann, wurde überprüft, wie viele und welche der aufgeführten Tiefenkriterien notwendig sind, um einen adäquaten räumlichen Tiefeneindruck entstehen zu lassen. Da die Wirkung der Tiefenkriterien von deren Kombination und von der Gestaltung der Versuchsreize abhängig ist, konnte anhand der Ergebnisse der Literaturanalyse nur eine vorläufige Entscheidung darüber getroffen werden, welche Tiefenkriterien in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen tatsächlich verwendet werden sollten. Es wurde hier der Empfehlung von Hsu et al. (1996) gefolgt, jede Anwendung für sich zu untersuchen, um die richtigen Gestaltungsentscheidungen zu fällen.

Die Art und Anzahl der monokularen Tiefenkriterien wurde in vier Bedingungen variiert (s. Abb. 7-1). Maximal waren in den Versuchsreizen die relative Größe und Höhe, Perspektive, Textur und Verdeckung enthalten. Die Ebene und die Wand dienten in der Anzeige als Objekte, an denen die Tiefenkriterien Perspektive und Textur ihre Wirkung entfalten konnten. Da die monokularen Tiefenkriterien aus Aufwandsgründen nicht vollständig kombiniert wurden, konnten lediglich Aussagen darüber getroffen werden, ob und wie sich der Tiefeneindruck dadurch verändert, dass einzelne Tiefenkriterien zu einer vorhandenen Kombination hinzugefügt wurden. Es wurde angenommen, dass sich die Tiefenwahrnehmung mit zunehmender Anzahl monokularer Tiefenkri-

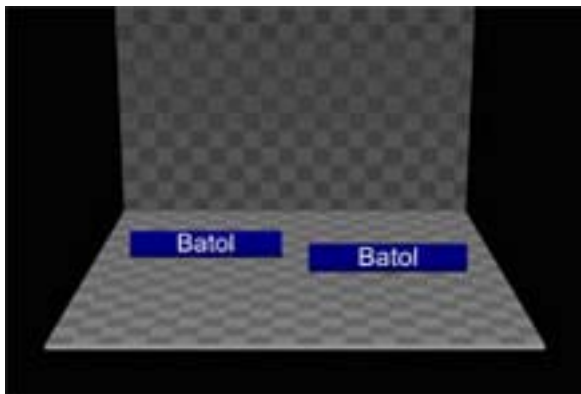
terien verbessert und sich bereits mit diesen wenigen monokularen Tiefenkriterien ein stabiler Tiefeneindruck einstellt. Da mehr als vier Bedingungen monokularer Tiefenkriterien den zeitlichen Rahmen des Experiments gesprengt hätten, wurde das Tiefenkriterium Schatten nicht untersucht.



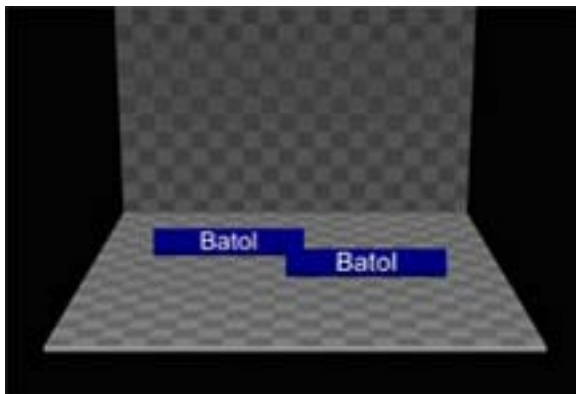
TK1: Relative Größe und Höhe



TK2: Relative Größe und Höhe, Perspektive



TK3: Relative Größe und Höhe, Perspektive, Textur



TK4: Relative Größe und Höhe, Perspektive, Textur, Verdeckung

### Abbildung 7-1: Versuchsreize für Experiment 1

Die Abbildung zeigt von links oben nach rechts unten die monoskopischen Versuchsreize für die vier Stufen des Faktors *monokulare Tiefenkriterien (TK)*. TK1 ist mit dem kleinsten Abstand 1 zwischen den beiden blauen Quadraten in der Tiefe, TK2 mit Abstand 2, TK3 mit Abstand 4 und TK4 mit Abstand 6 abgebildet.

Als weiteres Tiefenkriterium wurde die stereoskopische Disparität untersucht. Es interessierte die Frage, ob eine stereoskopische Darbietung von 3D-Anzeigen die räumliche Tiefenwahrnehmung nachweisbar verbessert. In der Literatur überwiegen die Hinweise darauf, dass sich der Nutzen einer stereoskopischen Darbietung vor allem dann zeigt, wenn 3D-Anzeigen nur wenige monokulare Tiefenkriterien, Objekte oder visuelle Hilfsmittel enthalten (Doshier et al., 1986; Grossman & Balakrishnan, 2006; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Park & Woldstad, 2000; Sollenberger & Milgram, 1993; van der Meer, 1979; Viswanathan & Mingolla, 2002; Ware & Franck, 1996; Xiao & Milgram, 1992; Zenyuh et al., 1988) oder wenn kleine Tiefenunterschiede erkannt werden müssen (Yeh & Silverstein, 1992). Es sollte deshalb für die ausgewählte Kombination monokularer Tiefenkriterien überprüft

werden, bei wie vielen und welchen monokularen Tiefenkriterien und bei welchem Tiefenunterschied zwischen den Objekten sich Vorteile einer stereoskopischen Darbietung zeigen. Zur Variation des Tiefenunterschieds wurde der Abstand zwischen den beiden Quadern in der Tiefe in sieben Stufen (A0 bis A6) umgesetzt.

Die stereoskopische Darstellung wurde zum einen mit Hilfe eines autostereoskopischen Displays (ASD) mit Barrierenmaske und zum anderen mit einer Shutterbrille realisiert. Mit einem ASD entsteht der plastische 3D-Effekt ohne zusätzliche Brille, sodass diese Displays für einen Einsatz in Fahrzeugen prinzipiell geeignet sind. Bei der Betrachtung des verwendeten ASD fielen die geringe Auflösung wegen der acht Ansichten sowie die geringe Brillanz und Helligkeit der Anzeige wegen der Barrierenmaske auf. Ein 8-Ansichten-ASD mit Barrierenmaske wurde verwendet, da die Technologie für eine Verwendung im Fahrzeug geeignet erschien und die acht Ansichten einen größeren Bewegungsbereich des Kopfes erlauben, in dem der Betrachter ruckelfrei stereoskopisch sieht (s. Abschn. 5.4.2). Da es in der Literatur Anzeichen dafür gibt, dass derzeitige ASD noch nicht die Wahrnehmungsqualität von Shutter- oder Polarisationsbrillen erreichen (Hutarew et al., 2004; Quante & Hopf, 2003), wurde dies auch für das hier verwendete ASD vermutet. Die Bedingung Shutterbrille diente als Referenz für die Messung potenzieller Vorteile einer stereoskopischen Darbietung für die räumliche Tiefenwahrnehmung. Diese Technologie gewährleistet hochwertige stereoskopische Anzeigen und wurde bisher in vielen Studien eingesetzt. In diesem Experiment sollte der Nachteil einer aktuellen fahrzeugtauglichen ASD-Technologie gegenüber stereoskopischen Anzeigen mit Shutterbrille quantifiziert werden, um Potenziale für die technische Weiterentwicklung zu identifizieren.

Beim Betrachten stereoskopischer Anzeigen berichten einige Nutzer, dass sich der plastische 3D-Effekt nicht sofort, sondern erst mit einer gewissen Verzögerung einstellt. Eine Abhängigkeit der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung von der Darbietungsdauer der Reize wurde in einigen Studien nachgewiesen (Marrara & Moore, 2000; Patterson & Fox, 1984; Patterson et al., 1992; Tam & Stelmach, 1998). Da Blickwechsel zwischen Außensicht und Display während der Fahrt häufig vorkommen, könnte die stereoskopische Latenz alle möglichen Vorteile stereoskopischer Anzeigen in Fahrzeugen kompensieren. Da bisher keine Erkenntnisse zur stereoskopischen Latenz bei häufigen Blickwechseln vorliegen, wurde diese Frage ebenfalls untersucht.

Zusammenfassend wurden in Experiment 1 die Faktoren *Abstand* (A0 bis A6), *monokulare Tiefenkriterien* (TK1 bis TK4), *Display* (Mono, Stereo-Shutter, ASD) und *Blickwechsel* (ohne, mit) untersucht. Als Zielreize wurden Elemente einer Anzeige für die Menüauswahl in Form von einfachen Quadern verwen-

det. Die umgebende 3D-Szene bestand aus zwei Flächen, einer Ebene und einer Wand. Diese einfachen Versuchsreize sollten sicherstellen, dass die Ergebnisse des Experiments auf eine breite Auswahl an 3D-Anzeigen verallgemeinerbar sind. Die Tiefenwahrnehmung wurde mit Hilfe einer Versuchsaufgabe zur Bestimmung der Tiefenordnung („Welches Objekt befindet sich weiter vorn?“) operationalisiert. Diese Aufgabe entspricht dem grundlegenden ordinalen räumlichen Tiefenurteil, welches mit größter Genauigkeit (Tittle et al., 2001) und mit Hilfe jeden Tiefenkriteriums (Cutting & Vishton, 1995) gefällt werden kann. Darüber hinaus wurde die Bestimmung der Tiefenordnung bereits in zahlreichen anderen Studien eingesetzt (z.B. Ichikawa & Saida, 1996; Yeh & Silverstein, 1992). Reaktionszeiten und Fehler dienten als abhängige Variablen. Dabei waren die Reaktionszeiten das entscheidende Maß, weil aufgrund der einfachen Aufgabe und der Instruktion schnell und genau zu arbeiten, nur wenige Fehler zu erwarten waren.

Im Einzelnen wurden folgende Hypothesen überprüft:

- **Hypothese 1:** Ein räumlicher Tiefeneindruck entsteht umso eindeutiger (d.h. fehlerfreier) und schneller, je mehr monokulare Tiefenkriterien verwendet werden.
- **Hypothese 2a:** Der Vorteil einer stereoskopischen Darstellung mit Shutterbrille gegenüber einer monoskopischen zeigt sich bei wenigen monokularen Tiefenkriterien.
- **Hypothese 2b:** Der Vorteil einer stereoskopischen Darstellung mit Shutterbrille gegenüber einer monoskopischen zeigt sich bei kleinen Abständen.
- **Hypothese 3:** Das verwendete ASD erreicht noch nicht die Wahrnehmungsqualität stereoskopischer Darstellungen mit Shutterbrille. Der räumliche Tiefeneindruck entsteht mit Shutterbrille eindeutiger (d.h. fehlerfreier) und schneller als mit dem ASD.
- **Hypothese 4:** Die räumliche Tiefenwahrnehmung dauert bei Blickwechseln von der natürlichen räumlichen Umwelt zu einer stereoskopischen 3D-Anzeige länger als bei Blickwechseln zu einer monoskopischen 3D-Anzeige.

## 7.2 Methode

### 7.2.1 Versuchsplan

Es wurde ein varianzanalytischer Versuchsplan mit Messwiederholung auf allen vier Faktoren angewendet. Der Faktor *Abstand* wurde siebenstufig (A0



bis A6), der Faktor *monokulare Tiefenkriterien* vierstufig (TK1 bis TK4), der Faktor *Display* dreistufig (Mono, Stereo-Shutter, ASD) und der Faktor *Blickwechsel* zweistufig (ohne, mit) realisiert. Alle Faktoren wurden vollständig kombiniert. Der Versuchsplan ist in Tabelle 7-1 dargestellt.

**Tabelle 7-1: Versuchsplan für Experiment 1**

Mono- kulare TK	Display =>	Mono		Stereo- Shutter		ASD	
	Blickwechsel =>	ohne	mit	ohne	mit	ohne	mit
TK 1	Relative Größe und Höhe	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
TK 2	TK1 + Perspektive	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
TK 3	TK2 + Textur	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
TK 4	TK3 + Verdeckung	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>

Anmerkung: TK = Tiefenkriterien. N1 ist eine Stichprobe.

Die Versuchsreize wurden in drei Blöcken über den Faktor *Display* und innerhalb jedes dieser drei Blöcke in weiteren zwei Blöcken über den Faktor *Blickwechsel* dargeboten. Innerhalb jedes Blocks wurden vier Durchgänge für die Stufen des Faktors *monokulare Tiefenkriterien* absolviert. Jeder dieser Durchgänge bestand aus 28 Reizen (7 Abstände x 2 Bedingungen = linker oder rechter Quader vorn x 2 Wiederholungen), sodass insgesamt 672 Reize bearbeitet wurden. Die Reihenfolgen der Stufen der Faktoren *Display*, *Blickwechsel* und *monokulare Tiefenkriterien* wurden vollständig permutiert und zufällig kombiniert. Die 28 Versuchsreize eines Durchgangs wurden randomisiert dargeboten. Abhängige Variablen waren die Reaktionszeit in Millisekunden und die Fehler in Prozent.

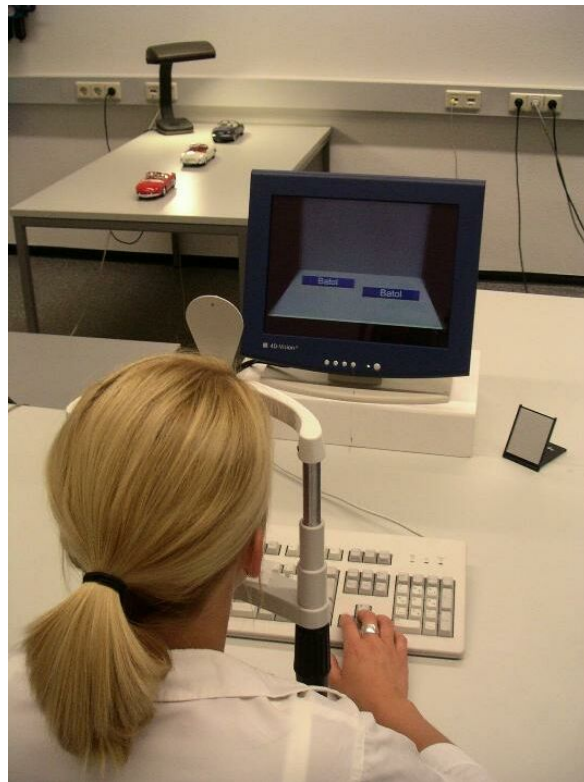
### 7.2.2 Versuchsteilnehmer

An der Untersuchung nahmen 24 Probanden (11 Frauen, 13 Männer) mit einem durchschnittlichen Alter von 37.2 Jahren ( $SD = 9.7$ , 24 bis 56 Jahre) teil. Da alle Teilnehmer Angestellte der Daimler AG waren, wurde keine Aufwandsentschädigung gezahlt. Um sicherzustellen, dass kein Proband mit weniger als 0.7 Visus Nah- oder Fernsehschärfe und mit weniger als zwei Bogenminuten Stereosehschärfe am Experiment teilnahmen, wurden Sehtests mit Hilfe des Gerätes Binoptometer II (Fa. Oculus) durchgeführt. Während des Experiments trugen 13 Versuchsteilnehmer eine Sehhilfe. Sechs Probanden mit leichter Rot-Grün Schwäche - gemessen mit vier Farbtafeln nach Ishihara - beantworteten die Fragen zu den Farben des Reizmaterials richtig und nahmen am Experiment teil.

### 7.2.3 Apparatur

Das Experiment fand im Juni 2003 in einem Versuchslabor der Daimler AG in Stuttgart-Untertürkheim statt. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 7-2. Die

Probanden saßen auf einem höhenverstellbaren Bürostuhl vor einem PC-Monitor. Eine Kinnstütze gewährleistete einen Abstand von 70 cm zwischen Proband und Monitor und eine vergleichbare Kopfposition für alle Probanden. Für die monoskopische Präsentation wurde ein Röhrenmonitor verwendet (Fa. Sony, Typ E250, 17 Zoll, Format 4:3, 1024 x 768 Pixel, Pixelgröße 0.31 mm, Bildwiederholrate 100 Hz). Der aktive Anzeigebereich des Röhrenmonitors wurde auf die Größe des ASD angeglichen. Die stereoskopische Darstellung mit kabelloser Shutterbrille (Fa. Elsa, Typ Revelator) wurde mit dem gleichen Röhrenmonitor und einer Bildwiederholrate von 50 Hz für jedes Auge realisiert. In den monoskopischen Durchgängen wurde die Shutterbrille ebenfalls getragen, um vergleichbare Helligkeiten zu gewährleisten. Bei der ASD-Bedingung wurde die Shutterbrille nicht getragen, da sich dadurch die Farbigkeit auf dem ASD so stark veränderte, dass der stereoskopische Eindruck darunter litt. Es wurde ein 8-Ansichten-ASD mit Barrierenmaske der Firma 4D Vision verwendet (TFT-Display, 15 Zoll, Format 4:3, 1024 x 768 Pixel, Pixelgröße 0.30 mm, Bildwiederholrate 60 Hz). Helligkeit, Position und Ausrichtung aller Monitore wurden angeglichen.



**Abbildung 7-2: Versuchsaufbau für Experiment 1**

In der linken Abbildung ist der Versuchsaufbau mit Kinnstütze, PC-Tastatur, Emmitter für die Ansteuerung der Shutterbrille, Taschenspiegel, PC-Röhrenmonitor und die Anordnung der drei Modell-Fahrzeuge für den Ablauf *mit Blickwechsel* zu sehen. Die rechte Abbildung zeigt eine Probandin während der Bearbeitung einer Versuchsaufgabe mit dem ASD.

Die Reaktionen der Probanden wurden über drei Tasten einer PC-Tastatur eingegeben. Die Ansteuerung der Monitorvarianten, die Darbietung der

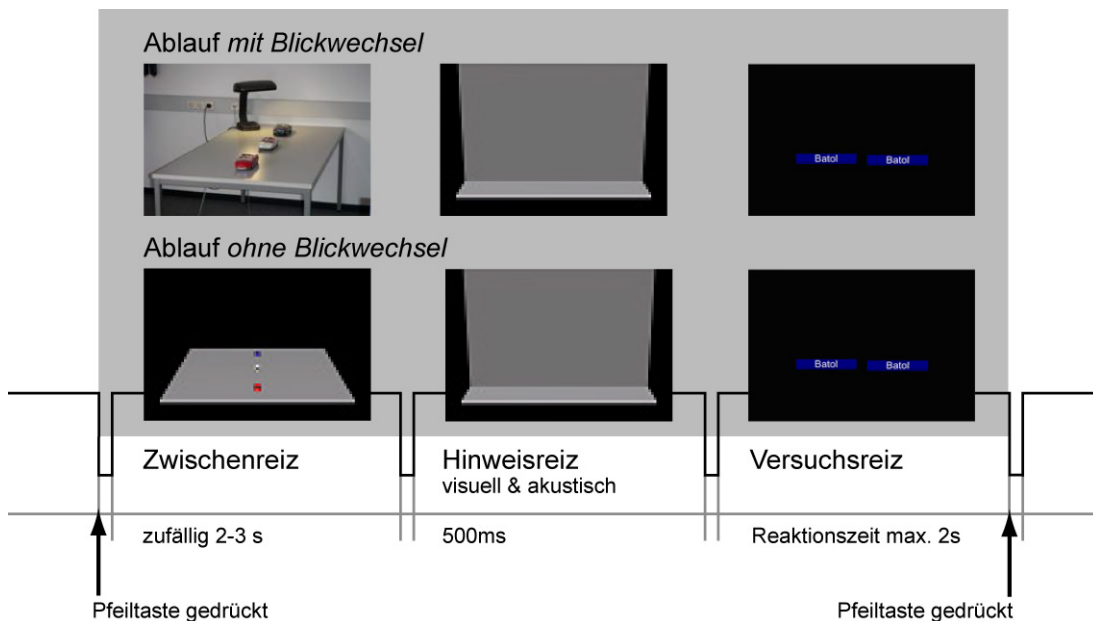
Versuchsreize, die Versuchssteuerung und die Datenaufzeichnung erfolgten über einen PC. An diesen war ein weiterer Monitor für die Versuchsleiterin angeschlossen. Die Reaktionszeiten und Fehler wurden in Zyklen von 100 Hz aufgezeichnet. Anstelle der Reaktionszeit wurde ein Missing eingetragen, sobald diese eine Dauer von 2 s überschritt, was insgesamt 14mal vorkam.

#### **7.2.4 Versuchsreiz**

Es wurden Elemente einer Anzeige für die Menüauswahl verwendet (s. Abb. 7-1). Auf zwei blauen Quadern befand sich das Kunstwort „Batol“ in weißer Schrift. Die Schrift diente der Verstärkung des Effekts des Tiefenkriteriums relative Größe. Die sieben unterschiedlichen Abstände zwischen den beiden Quadern in z-Richtung betrugen 0, 5, 10, 15, 20, 25 und 30 Displayeinheiten. Die vier Stufen des Faktors *monokulare Tiefenkriterien* werden in Anhang A in Tabelle A-1 detailliert beschrieben. Die Stereoparameter und Disparitäten sind in Anhang A in Tabelle A-2 aufgeführt. Die Disparitäten waren aufgrund der Displayeigenschaften mit der Shutterbrille etwas größer als mit dem ASD. Der vordere Rand der grauen Ebene schwebte vor der Bildschirmenebene hin zum Betrachter. Die Versuchsreize erschienen hinter der Bildschirmenebene weg vom Betrachter. Der vertikale Kameraöffnungswinkel betrug  $18.1^\circ$  und entsprach dem Blickwinkel einer Versuchsperson auf den 70 cm entfernten PC-Monitor mit einer Bildhöhe von 22.9 cm. Die virtuelle Kamera war auf den Bildmittelpunkt gerichtet, von dem die beiden Quader in z-Richtung gleichweit entfernt waren. Der Abstand 0 diente als Distraktor, um die Ratewahrscheinlichkeit auf ein Drittel zu verringern.

#### **7.2.5 Durchführung und Versuchsaufgaben**

Das Experiment dauerte mit jedem Probanden ca. 1 Stunde und 20 Minuten. Zunächst wurden Inhalt und Ablauf des Versuchs erläutert. Die Probanden füllten einen demographischen Fragebogen aus und führten einen Sehtest durch. Sie wurden darüber informiert, dass sie während des Versuchs drei verschiedene Displayvarianten kennen lernen, die ihnen einen räumlichen Tiefeneindruck vermitteln. Danach wurde die Versuchsaufgabe erklärt. Die Probanden sollten per Tastendruck auf einer PC-Tastatur entscheiden, welcher von zwei blauen Quadern sich weiter vorn (näher zum Probanden hin) befand, der rechte oder der linke Quader bzw. ob beide Quader gleich weit entfernt waren. Entsprechend sollte die rechte oder linke Pfeiltaste bzw. die Pfeiltaste nach unten gedrückt werden. Sie bedienten die Tasten blind mit drei Fingern der rechten Hand, die während eines Experimentaldurchgangs auf den Tasten ruhten. Die Probanden wurden instruiert, ihre Entscheidung über die Tiefenordnung der Quader sowohl schnell als auch genau abzugeben.



**Abbildung 7-3: Schematischer Ablauf *mit* und *ohne* Blickwechsel für Experiment 1**

Anschließend wurde der Ablauf der Bedingungen *ohne* und *mit* Blickwechsel erklärt und jeweils anhand von mindestens 12 Übungsreizen trainiert, bis ein reibungsloser Ablauf gegeben war (s. Abb. 7-3). In der Bedingung *ohne* Blickwechsel erschien nach der Reaktion der Probanden auf einen Versuchsreiz für 2 s bis 3 s in zufälliger Darbietungsdauer ein Zwischenreiz. Dieser bestand aus einer Ebene mit drei Fahrzeugen in rot, weiß und blau. Die Probanden wurden instruiert, das am weitesten entfernte blaue Fahrzeug zu fokussieren. Das diente dazu, dass sie während der Zeit des Zwischenreizes weiter eine monoskopische bzw. stereoskopische Darstellung betrachteten. Als Hinweis auf den nächsten Versuchsreiz hörten sie für 200 ms einen Ton, den sie sich zuvor in der Lautstärke selbst einstellten, und sahen gleichzeitig auf dem Display für 500 ms eine graue Wand. Wenn der Proband keine Eingabe vornahm, schaltete der Versuchsreiz nach 2 s auf den Zwischenreiz um und es wurde ein Missing protokolliert. Die Probanden erhielten keine Rückmeldung über die Richtigkeit ihrer Eingaben. Der Ablauf der Bedingung *mit* Blickwechsel unterschied sich dadurch, dass die Probanden keinen Zwischenreiz auf dem Display präsentiert bekamen, sondern anstelle dessen ihren Blick nach links zu einem Tisch wechselten. Dort sollten sie auf das am weitesten entfernte blaue Fahrzeug schauen, das in einer Reihe von drei 25 cm langen Modell-Fahrzeugen in rot, weiß und blau stand. Während des Blickwechsels wurde analog zum Blickwechsel zwischen Display und Fahrzeugumgebung in der Realität sowohl auf eine natürliche stereoskopische Wahrnehmung umgestellt als auch fernakkommodiert. Dies wurde dadurch sichergestellt, dass sich das am weitesten entfernte blaue Fahrzeug in einem Abstand von 3.3 m vom Betrachter befand (vgl. Campbell & Westheimer, 1960). Für den Blickwechsel

reichten Augenbewegungen aus, die von der Versuchsleiterin mit Hilfe eines Taschenspiegels überprüft wurden. Zu Beginn einer neuen Displaybedingung bearbeiteten die Probanden jeweils 12 Reizvorlagen *mit* und *ohne Blickwechsel*, um sich auf das neue Display einzustellen. Nach jeder Displaybedingung gab es eine kurze Pause.

### 7.3 Ergebnisse

Die statistischen Analysen dieser Arbeit wurden mit dem Softwarepaket SPSS 12.0 durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde auf 5% festgelegt. Für die Reaktionszeiten und für die Fehlerprozente wurden je eine univariate vierfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung gerechnet. Es wurde die klassische Methode nach Fischer gewählt, da nur innerhalb dieser die Korrektur der Freiheitsgrade nach Greenhouse und Geiser (1958) bei einer Verletzung der Sphärizitätsannahme möglich ist. In den Ergebnissen wird immer die Anzahl der unkorrigierten Freiheitsgrade, aber die nach Greenhouse und Geiser (1958) korrigierte Irrtumswahrscheinlichkeit angegeben. Aus den fehlerfreien Reaktionen der Probanden wurden die mittleren Reaktionszeiten für jede Bedingung errechnet. Die Normalverteilungsannahme wurde in 11 von 168 Variablen mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests nicht bestätigt. Da die Auswertung in diesen Fällen mit dem parameterfreien Friedmann-Test und Wilcoxon-Test keine abweichenden Ergebnisse erbrachte, werden auch hier die Ergebnisse der parametrischen Verfahren berichtet. Die Fehlerprozente wurden mit Hilfe der Transformation nach Winer (1962) umgerechnet ( $2 \arcsin((\text{score}/\text{total})^{1/2})$ ), um die Normalverteilungs- und Varianzhomogenitätseigenschaften so zu verbessern, dass die Voraussetzungen für die Varianzanalyse gesichert waren. Um die Anschaulichkeit zu sichern, werden im Text, in den Abbildungen und Tabellen die nicht transformierten Fehler angegeben. Die Überprüfung der Sphärizität und die Korrektur der Freiheitsgrade wurden wie bei den Reaktionszeiten vorgenommen. Einzelvergleiche konnten wegen des Messwiederholungsdesigns nicht mit post-hoc-Tests überprüft werden (vgl. Loftus & Masson, 1994). Da die Hypothesen über Unterschiede zwischen Faktorstufen bzw. Kombinationen von Faktorstufen a-priori feststanden, wurden gerichtete *t*-Tests für abhängige Stichproben ohne Korrektur der Irrtumswahrscheinlichkeit eingesetzt (vgl. Bortz, 1993, S.250). Die statistischen Kennwerte sind in Anhang A in den Tabellen A-3 bis A-6 zu finden.

#### 7.3.1 Abstand

Der Faktor *Abstand* wurde zur Kontrolle des Einflusses der Aufgabenschwierigkeit ausgewertet. Es zeigten sich die erwarteten signifikanten Haupteffekte für die Reaktionszeit,  $F(6, 138) = 75.61, p < .001$ ; und für die Fehlerprozente,  $F(6, 138) = 25.20, p < .001$ . Je geringer der Abstand, desto schwieriger war die

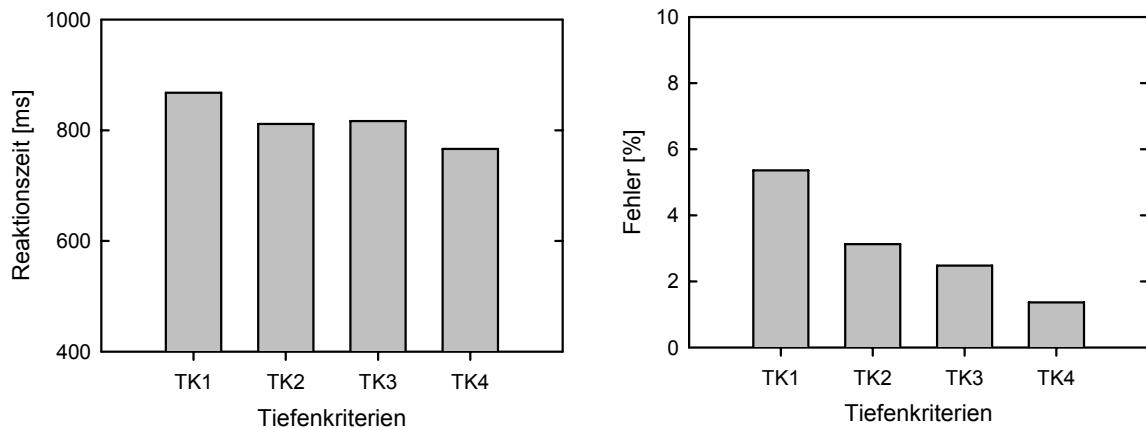
Schätzung der Tiefenordnung. Die Reaktionszeiten betrugen  $A0 = 1009$  ms,  $A1 = 950$  ms,  $A2 = 788$  ms,  $A3 = 751$  ms,  $A4 = 739$  ms,  $A5 = 734$  ms und  $A6 = 738$  ms. Die mittleren Fehlerprozentage betrugen  $A0 = 7.6\%$ ,  $A1 = 4.7\%$ ,  $A2 = 1.7\%$ ,  $A3 = 1.5\%$ ,  $A4 = 1.3\%$ ,  $A5 = 0.9\%$  und  $A6 = 1.3\%$ . In den Reaktionszeiten unterschieden sich Abstand 0 bis 4 jeweils signifikant, in den Fehlerprozenten waren es die Abstände 0 bis 2. Zwischen den größeren Abständen gab es keine Unterschiede. Wie erwartet benötigten die Probanden am längsten und begingen die meisten Fehler, wenn es keinen Abstandsunterschied gab. Getrennte Varianzanalysen für die schwierigen (Abstand 0 bis 3) und für die leichten Aufgaben (Abstand 4 bis 6) zeigten identische Haupt- und Wechselwirkungseffekte wie die Auswertung aller Aufgaben. Deshalb wurden in die nachfolgenden Auswertungen die Daten aller Abstände einbezogen.

### 7.3.2 Monokulare Tiefenkriterien

Für den Faktor *monokulare Tiefenkriterien* ergaben die Varianzanalysen signifikante Haupteffekte in den Reaktionszeiten,  $F(3, 69) = 31.69, p < .001$ ; und in den Fehlerprozenten,  $F(3, 69) = 7.87, p < .001$ . Wie erwartet nahmen mit zunehmender Anzahl der monokularen Tiefenkriterien die Reaktionszeiten und die Fehler ab (s. Abb. 7-4). Die mittleren Reaktionszeiten betrugen  $TK1 = 868$  ms,  $TK2 = 811$  ms,  $TK3 = 817$  ms und  $TK4 = 766$  ms. Die mittleren Fehler betrugen  $TK1 = 5.4\%$ ,  $TK2 = 3.2\%$ ,  $TK3 = 2.5\%$  und  $TK4 = 1.4\%$ . Sowohl für die Reaktionszeiten als auch für die Fehler waren die Unterschiede zwischen  $TK1$  und  $TK2$  bzw. zwischen  $TK3$  und  $TK4$  mindestens auf dem 5%-Niveau signifikant. Die perspektivische Darstellung von Ebene und Wand sowie die Verdeckung verbesserten somit den Tiefeneindruck. Da sich  $TK2$  und  $TK3$  weder in den Reaktionszeiten noch in den Fehlern unterschieden, wurde gefolgert, dass die verwendete Schachbrettmuster-Textur keine zusätzlichen Vorteile erbrachte.

Die Auswertung der Wechselwirkung zwischen den Faktoren *monokulare Tiefenkriterien* x *Display* ergab signifikant unterschiedliche Verläufe für die drei Displays (s. Abschn. 7.3.3). In der Mono-Bedingung zeigte sich eindeutig, dass das Schätzen der Tiefenordnung mit zunehmender Anzahl von Tiefenkriterien leichter fiel. Nur die Textur erbrachte keinen signifikanten Vorteil. Bei der stereoskopischen Darstellung mit Shutterbrille verbesserten die Tiefenkriterien Perspektive und Verdeckung die Tiefenwahrnehmung. Die verwendete Textur führte hier zu signifikant schlechteren Leistungen. Mit ASD verbesserten sich nur mit dem Tiefenkriterium Verdeckung die Reaktionszeiten.

Zusammenfassend entstand der räumliche Tiefeneindruck wie erwartet mit zunehmender Anzahl von Tiefenkriterien eindeutiger und schneller. Perspektivische und Verdeckung führten zu einer Verbesserung des Tiefeneindrucks, die Schachbrett-Textur jedoch nicht.



**Abbildung 7-4: Ergebnisse Faktor *monokulare Tiefenkriterien* für Experiment 1**

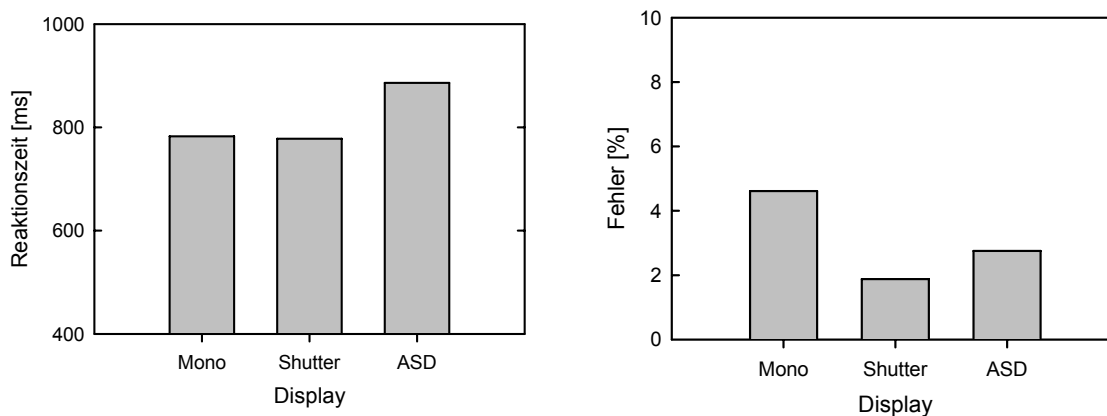
In der linken Abbildung sind die mittleren Reaktionszeiten im Schätzen der Tiefenordnung für die vier Stufen des Faktors *monokulare Tiefenkriterien* (TK1: relative Größe und Höhe, TK2: TK1 + Perspektive, TK3: TK2 + Textur, TK4: TK3 + Verdeckung) dargestellt, in der rechten die mittleren Fehlerprozent. ( $N = 24$ ).

### 7.3.3 Stereoskopische Darstellung

Für den Faktor *Display* erbrachte nur die Varianzanalyse der Reaktionszeiten einen signifikanten Haupteffekt,  $F(2, 46) = 11.38, p < .001$ . Mit dem ASD ( $M = 886$  ms) benötigten die Probanden 108 ms länger als mit der Shutterbrille ( $M = 778$  ms) und 103 ms als in der Mono-Bedingung ( $M = 783$  ms). Beide Unterschiede waren auf dem 1%-Niveau signifikant. Die Reaktionszeiten der Mono- und der Shutter-Bedingungen waren vergleichbar. In den Fehlerprozenten zeigte sich wegen der großen Streuungen kein signifikanter Haupteffekt. Die stereoskopische Darstellung mit Shutterbrille ( $M = 1.7\%$ ) war jedoch dem konventionellen Display ( $M = 4.3\%$ ) und dem ASD ( $M = 2.2\%$ ) tendenziell überlegen. Bei dem vertrauten Reizmaterial (Mono) gab es eine stärkere Tendenz dazu, schneller zu antworten und dabei Fehler in Kauf zu nehmen als bei unbekanntem Reizmaterial (ASD). Da die Fehlerraten der Mono- und ASD-Bedingungen vergleichbar waren, wurde jedoch nicht von einem *speed-accuracy trade off* zwischen den beiden Bedingungen gesprochen.

Insgesamt führte die stereoskopische Darstellung mit Shutterbrille zu keiner schnelleren und eindeutigeren Tiefenwahrnehmung als die monoskopische. Das ASD ergab wie erwartet eine langsamere und tendenziell weniger eindeutige Tiefenwahrnehmung als die stereoskopische Darstellung mit Shutterbrille.

Signifikante Wechselwirkungen zwischen den Faktoren *Display* x *monokulare Tiefenkriterien* gab es wie erwartet für die Reaktionszeiten,  $F(6, 138) = 8.46, p < .01$ ; und für die Fehlerprozen- te,  $F(6, 138) = 3.12, p < .05$ . Die stereoskopische Darstellung mit Shutterbrille führte nur bei der geringsten Menge an Tiefenkriterien zu signifikant kürzeren Reaktionszeiten als die monoskopische (s. Abb. 7-6). Bei TK2 unterschieden sich die Displays nicht, bei TK3 war die monoskopische Anzeige sogar signifikant und bei TK4 zumindest tendenziell schneller als die Anzeige mit Shutterbrille. Die Verläufe der Fehler (s. Abb. 7-6) wiesen darauf hin, dass insbesondere bei wenigen Tiefenkriterien die monoskopische Darstellung beiden stereoskopischen unterlegen war, wenn auch die einzelnen Unterschiede wegen der großen Streuungen nicht signifikant waren. Insgesamt war die stereoskopische Darstellung mit Shutterbrille der monoskopischen nur bei der geringsten Menge an Tiefenkriterien (relative Größe und relative Höhe) überlegen.

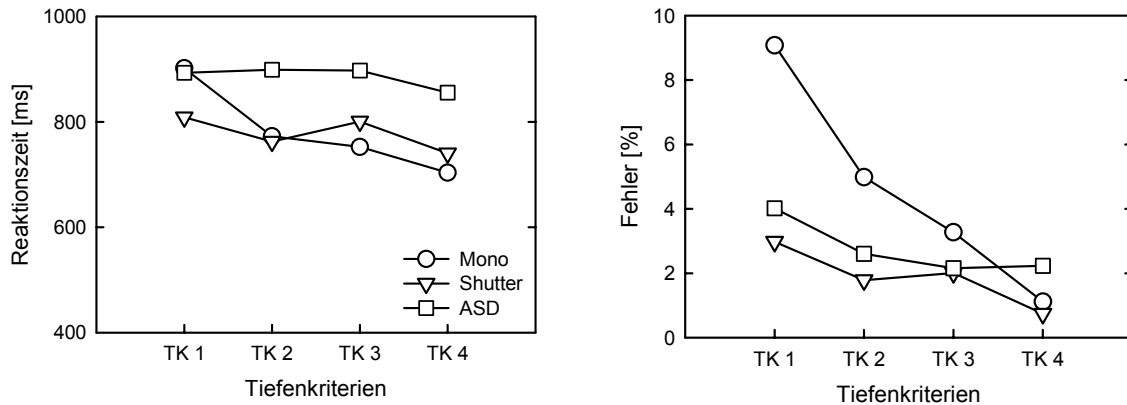


**Abbildung 7-5: Ergebnisse Faktor *Display* für Experiment 1**

In der linken Abbildung sind die mittleren Reaktionszeiten im Schätzen der Tiefenordnung für die drei Stufen des Faktors *Display* dargestellt, in der rechten die mittleren Fehlerprozen- te. ( $N = 24$ ).

Entgegen den Erwartungen gab es für die Reaktionszeiten keine signifikante Wechselwirkung der Faktoren *Display* x *Abstand*. Für alle drei Displayarten zeigten sich vergleichbare Verläufe. Selbst bei kleinen Abständen zeigte sich kein Unterschied zwischen den Mono- und Shutter-Bedingungen. Die Reaktionszeiten mit dem ASD unterschieden sich in allen Abständen signifikant von den Shutter- und der Mono-Bedingungen. In der Varianzanalyse der Fehlerprozen- te wurde die Wechselwirkung *Display* x *Abstand* zwar signifikant,  $F(12, 276) = 5.64, p < .01$ , war aber lediglich auf uneinheitliche und schwer interpretierbare Ergebnisse für den Abstand 0 zurückzuführen. Insgesamt gab es keinen Nachweis dafür, dass eine stereoskopische Darstel- lung bei kleinen Abständen von Vorteil ist.





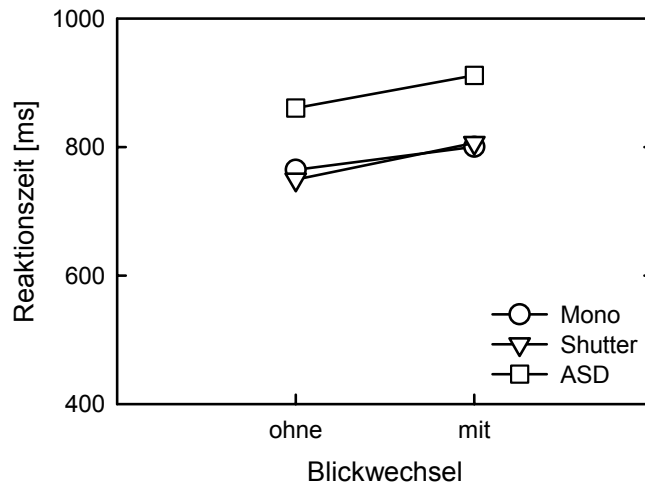
**Abbildung 7-6: Ergebnisse *monokulare Tiefenkriterien x Display* für Experiment 1**

Die linke Abbildung zeigt die mittleren Reaktionszeiten im Schätzen der Tiefenordnung in Abhängigkeit der Art des Displays und der Menge der monokularen Tiefenkriterien (TK1: relative Größe und Höhe, TK2: TK1 + Perspektive, TK3: TK2 + Textur, TK4: TK3 + Verdeckung). Die rechte Abbildung informiert über die mittleren Fehlerprozent in Abhängigkeit der monokularen Tiefenkriterien und der Art des Displays. ( $N = 24$ ).

### 7.3.4 Blickwechsel und stereoskopische Latenz

Es zeigte sich kein signifikanter Wechselwirkungseffekt zwischen den Faktoren *Blickwechsel x Display* in den Reaktionszeiten (s. Abb. 7-7). Der Unterschied zwischen den Bedingungen mit und ohne Blickwechsel war für die monoskopische Darstellung mit 36 ms nicht signifikant, während dies für die Shutterbrille ( $M = 57$  ms) und für das ASD ( $M = 51$  ms) mindestens auf dem 5%-Niveau der Fall war. Die Blickwechsel dauerten mit der Shutterbrille 21 ms und mit dem ASD 15 ms länger als auf dem konventionellen Display. Insgesamt konnten diese Unterschiede jedoch nicht als eindeutige Belege für eine stereoskopische Latenz aufgefasst werden, da die Blickwechsel mit den stereoskopischen Anzeigen mit mittleren 18 ms nur minimal länger waren als mit der monoskopischen Anzeige und die Wechselwirkung *Blickwechsel x Display* nicht signifikant war.

Die Durchgänge mit Blickwechsel ( $M = 840$  ms) dauerten trotz einer Anzeigedauer des Zwischenreizes von 500ms länger als die Durchgänge ohne Blickwechsel ( $M = 792$  ms),  $F(1, 23) = 5.96$ ,  $p < .05$ .



**Abbildung 7-7: Ergebnisse *Blickwechsel x Display* für Experiment 1**

Die Abbildung zeigt die mittleren Reaktionszeiten im Schätzen der Tiefenordnung in Abhängigkeit von der Blickwechsel-Bedingung und der Art des Displays. ( $N = 24$ ).

## 7.4 Diskussion

In Experiment 1 wurden sowohl die Wirkung des Einsatzes verschiedener monokularer Tiefenkriterien auf die räumliche Tiefenwahrnehmung untersucht als auch monoskopische und stereoskopische Darstellungen von 3D-Anzeigen verglichen. Die stereoskopische Darstellung wurde mit einer Shutterbrille und mit einem ASD umgesetzt, sodass beide Technologien verglichen werden konnten. Des Weiteren war von Interesse, ob beim Blickwechsel von der realen Umwelt auf ein Display mit künstlich erzeugter stereoskopischer Disparität eine zusätzliche Wahrnehmungszeit benötigt wird, um einen plastischen 3D-Effekt zu erleben. Als Versuchsmaterial wurde eine einfache 3D-Anzeige mit Objekten für eine Menüauswahl und als Versuchsaufgabe die Schätzung der Tiefenordnung verwendet. Die Ergebnisse dieses Experiments dienten dazu, Gestaltungsempfehlungen für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen abzuleiten.

Die Hypothese 1, dass der räumliche Tiefeneindruck umso eindeutiger und schneller entsteht, je mehr Tiefenkriterien zum Einsatz kommen, wurde bestätigt. Die perspektivische Darstellung von Ebene und Wand und die Verdeckung verbesserten die Tiefenwahrnehmung. Sogar mit den einfachen Tiefenkriterien relative Größe und relative Höhe stellte sich eine stabile Tiefenwahrnehmung ein. Die Textur erbrachte in der monoskopischen Darstellung keine Vorteile und in der stereoskopischen Darstellung mit Shutterbrille sogar Nachteile. Dieses Ergebnis war auf das spezielle Schachbrettmuster der verwendeten Textur zurückzuführen und nicht auf Texturen allgemein. In der Literatur überwiegen die Belege dafür, dass der Texturgradient ein mittelstarkes Tiefenkriterium ist (Thomas et al., 2002; Wickens et al., 1989). Das grobe, gleichförmige und kontrastreiche Muster erschwerte

möglicherweise die Trennung von Figur und Grund, weil sich deren geometrische Formen zu stark ähnelten (vgl. Thomas et al., 2002; Ware, 2004). Für die Entwicklung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen bleibt festzuhalten, dass bereits wenige monokulare Tiefenkriterien, die zudem technisch einfach umsetzbar sind, ausreichen, um einen stabilen Tiefeneindruck zu erzeugen. Dieses Ergebnis entspricht den Befunden in der Literatur (z.B. Alm et al., 2003; Kim, Ellis et al., 1987; Mazur & Reising, 1990). Aufwändige Effekte wie Texturen und Schatten könnten aber den Grad an Realismus und damit die Attraktivität von 3D-Anzeigen erhöhen. Die Schachbretttextur zeigte, dass diese Effekte mit Vorsicht eingesetzt werden sollten, da sie gegebenenfalls die visuelle Komplexität erhöhen und negative Wahrnehmungseffekte hervorrufen.

Die hochwertige stereoskopische Darstellung mit Shutterbrille führte insgesamt zu keiner schnelleren und eindeutigeren Tiefenwahrnehmung als die monoskopische. In der Shutter-Bedingung wurden lediglich tendenziell weniger Fehler als in der monoskopischen begangen. Nur in der Bedingung TK1 mit den monokularen Tiefenkriterien relative Größe und relative Höhe ergaben sich signifikant kürzere Reaktionszeiten mit der stereoskopischen Darbietung. Dieses Ergebnis bestätigt Hypothese 2a und stimmt mit den Befunden in der Literatur überein, dass sich die Vorteile der stereoskopischen Disparität meist nur in Anzeigen mit wenigen monokularen Tiefenkriterien, Objekten und visuellen Hilfsmitteln zeigen (z.B. Kim, Ellis et al., 1987; Park & Woldstad, 2000; Yeh & Silverstein, 1992). Da in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen vermutlich mehr monokulare Tiefenkriterien als nur die relative Größe und relative Höhe eingesetzt werden, bleibt hier ein zusätzlicher Vorteil der stereoskopischen Darstellung für die Tiefenwahrnehmung nachzuweisen. Hypothese 2b, dass sich der Vorteil einer stereoskopischen Darstellung insbesondere bei schwierigen Aufgaben mit kleinen Abständen zwischen den Objekten zeigt, wurde im Widerspruch zu den Ergebnissen von Yeh und Silverstein (1992) nicht bestätigt. Für die drei Displayvarianten zeigten sich die gleichen Verläufe über alle Abstände.

Wie in Hypothese 3 befürchtet, erreichte das ASD noch nicht die Qualität der stereoskopischen Darstellung mit Shutterbrille. Die Tiefenwahrnehmung war mit dem ASD 108 ms langsamer und tendenziell fehlerhafter als mit der Shutterbrille. Insbesondere die Auflösung der ASD muss verbessert werden, bevor eine Anwendung im Fahrzeug vorstellbar ist. Dieser Kritikpunkt wurde von 14 Probanden unaufgefordert erwähnt. Eine ASD-Technologie mit nur zwei Ansichten würde die Auflösung verbessern, aber auch den Bewegungsbereich des Kopfes verkleinern, in dem der plastische 3D-Eindruck ohne Ruckeln erhalten bleibt. Letzteres kann dadurch verhindert werden, dass die Maske auf dem 3D-Display der Blickrichtung des Fahrers nachgeführt wird, was aber

technisch sehr aufwändig ist. Aufgrund dieser Ergebnisse wurden sowohl die ASD-Technologie der Barrieremasken als auch der Linsenmasken technischen Weiterentwicklungen für eine Verwendung im Fahrzeug unterzogen.

Für Hypothese 4 zu einer stereoskopischen Latenz bei häufigen Blickwechseln zwischen Außensicht und Display wurden keine eindeutigen Belege gefunden. Es soll jedoch nicht unerwähnt bleiben, dass der Blickwechsel über beide stereoskopischen Anzeigen gemittelt 18 ms länger dauerte als mit der monoskopischen Anzeige. Wie kam es außerdem, dass die Reaktionszeiten mit Blickwechsel im Mittel 48 ms länger waren als ohne? Die Intervallzeit des Hinweisreizes betrug 500 ms, sodass alle notwendigen visuellen Anpassungsprozesse (Akkommodation ca. 400 ms: Campbell & Westheimer, 1960; Sakkade ca. 50 ms: Schiffman, 2001; kaum Adaptation, weil vergleichbare Leuchtdichten) hätten abgeschlossen sein müssen. Möglicherweise waren beim Blickwechsel aufwändigere Prozesse zur Fokussierung der Aufmerksamkeit notwendig als beim Verweilen des Blickes auf dem Bildschirm.

**Zusammenfassung.** Die stereoskopischen 3D-Anzeigen führten gegenüber den monoskopischen zu keinen nennenswerten Vorteilen in den Reaktionszeiten und Fehlerprozenten beim Bestimmen der Tiefenordnung. Sobald einige monokulare Tiefenkriterien in den Anzeigen enthalten waren, ließen sich überhaupt keine Vorteile der stereoskopischen Anzeigen finden. Zur stereoskopischen Latenz ist anhand der Ergebnisse aus diesem Experiment keine abschließende Aussage möglich. Ein Einsatz von ASD ist in Fahrzeugen erst dann denkbar, wenn sich deren Bildqualität verbessert und die gefundenen negativen Effekte auf die Tiefenwahrnehmung ausgeschlossen sind. Technisch einfach in Echtzeit zu realisierende Tiefenkriterien wie relative Größe, relative Höhe, Perspektive und Verdeckung reichen aus, um einen stabilen Tiefeneindruck zu erzeugen. Aufwändigere 3D-Effekte sollten zur Steigerung der Attraktivität nur mit Vorsicht eingesetzt werden, um die visuelle Komplexität nicht zu erhöhen und negative Wahrnehmungseffekte zu vermeiden.

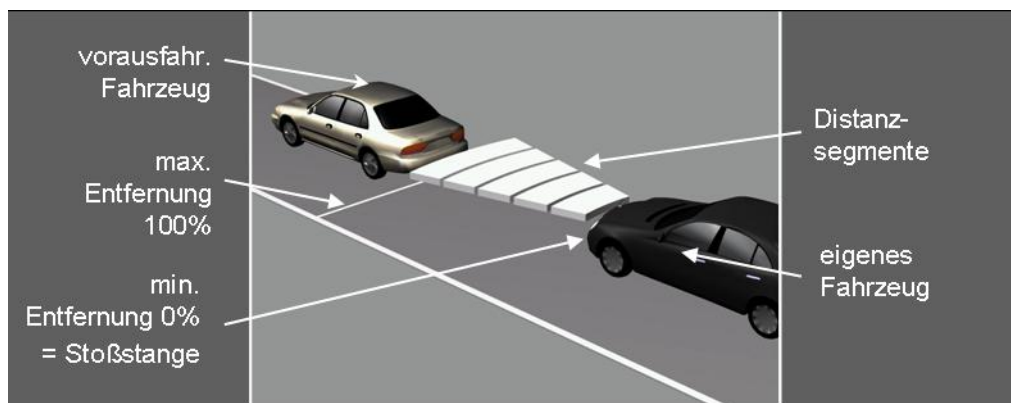
## **8 Experiment 2 – Perspektive, stereoskopische Disparität und visuelle Hilfsmittel als Gestaltungsparameter**

### **8.1 Fragestellung und Hypothesen**

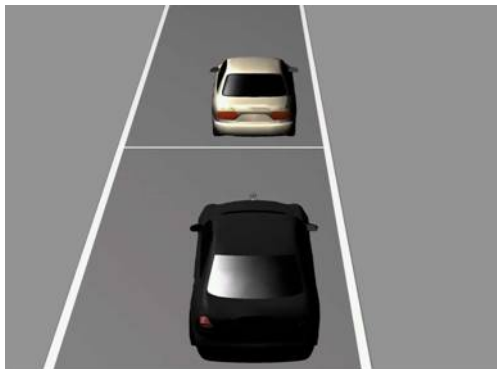
In Experiment 2 wurde in Ergänzung zu Experiment 1 der Einfluss weiterer Gestaltungsparameter auf die Tiefenwahrnehmung untersucht, um daraus Hinweise abzuleiten, wie in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen möglichst effektiv und effizient ein räumlicher Tiefeneindruck erzeugt werden kann. Der Schwerpunkt lag auf dem Gestaltungsparameter Perspektive. Von der Wahl der Perspektive hängt unter anderem ab, welche Auflösung räumliche Informationen in der Tiefe haben. Am Beispiel einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltem-pomaten wurde untersucht, wie sich unterschiedliche Kombinationen aus Azimut- und Höhenwinkeln - vermittelt über die daraus resultierende Auflösung in der Tiefe - auf die Güte von Tiefenurteilen auswirken. Da die Ungenauigkeit von Tiefenurteilen wegen der starken perspektivischen Verkürzung flacher Höhenwinkel ein häufig erwähnter Nachteil von 3D-Anzeigen ist (z.B. Barfield & Rosenberg, 1995; Smallman et al., 2002; Yeh & Silverstein, 1992), sollte die absolute Intensität dieses Effektes am Beispiel einer konkreten 3D-Anzeige für Fahrerassistenzsysteme systematisch überprüft und quantifiziert werden. In einem ersten Schritt wurde deshalb eine Aufgabe verwendet, die keinen Abgleich der Anzeige mit der Umgebung erforderte. In einem weiteren Schritt wurde in den Experimenten 3, 4 und 5 der Kompromiss zwischen der Verkürzung in der Tiefe und dem Abgleich zwischen Anzeige und Umgebung während der Fahrt thematisiert. In einer weiteren Bedingung wurde anknüpfend an Experiment 1 untersucht, ob sich mit einer anderen 3D-Anzeige und einer anderen Versuchsaufgabe erneut keine Unterschiede zwischen monoskopischer und stereoskopischer 3D-Darstellung finden lassen. Außerdem wurde überprüft, ob Distanzsegmente zwischen den Fahrzeugen als visuelle Hilfsmittel einen Vorteil für die Tiefenwahrnehmung in ungünstigen Perspektiven mit einer geringen Auflösung in der Tiefe erbringen. Abbildung 8-1 zeigt die Versuchsreize des Experiments 2.

Tiefenurteile sind mit Höhenwinkeln  $< 45^\circ$  ungenauer als mit Höhenwinkeln  $> 45^\circ$  (Barfield, Rosenberg et al., 1995; Yeh & Silverstein, 1992). Mit Höhenwinkeln aus der Fahrerperspektive sind aufgrund der starken Verkürzung in der Tiefe in abstrakten Kreuzungsdarstellungen die wesentlichen Merkmale der Abbiegesituation schlechter zu erkennen als in einer 2D-Draufsicht oder einer Perspektive mit einem Höhenwinkel von ca.  $45^\circ$  (Green & Williams, 1992; Heller et al., 2003). Um den Einfluss der perspektivischen Verkürzung auf die Qualität von Tiefenurteilen in 3D-Anzeigen für

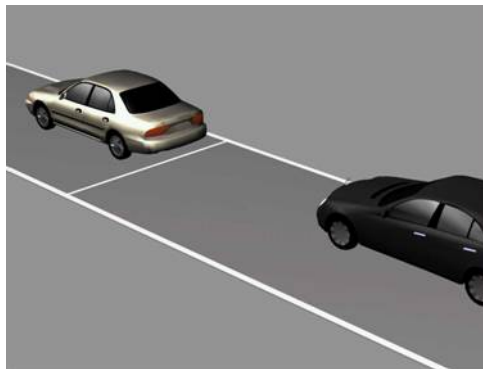
Fahrzeuge systematisch zu untersuchen, wurde mit den Höhenwinkeln  $13^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$  und  $90^\circ$  ein breiteres Spektrum an Höhenwinkeln verwendet, als in den bisherigen Studien zu dieser Frage geschehen. Der Höhenwinkel  $13^\circ$  ist zwar etwas höher als die reale Fahrerperspektive, stellte aber in den verwendeten 3D-Anzeigen die Alternative mit minimalem Höhenwinkel dar, wenn gleichzeitig der Eindruck entstehen sollte, dass die Perspektive aus der Position des Fahrers aufgenommen wurde. Der Höhenwinkel  $90^\circ$  realisiert die maximale Auflösung in der Tiefe. Es wurde angenommen, dass sich die Qualität der Tiefenurteile mit zunehmendem Höhenwinkel verbessert. Der Anstieg sollte bei Höhenwinkeln  $< 45^\circ$  steiler sein als bei Höhenwinkeln  $> 45^\circ$ , da die Auflösung in der Tiefe mathematisch dem Sinus des Höhenwinkels entspricht (Hickox & Wickens, 1999).



P7: Höhenwinkel  $22.5^\circ$ , Azimut  $45^\circ$



P2: Höhenwinkel  $22.5^\circ$ , Azimut  $0^\circ$



P7: Höhenwinkel  $22.5^\circ$ , Azimut  $45^\circ$

### Abbildung 8-1: Versuchsreize für Experiment 2

Die Abbildung zeigt zwei Perspektiven der monokopischen Versuchsreize. In der oberen Abbildung enthält die Perspektive 7 fünf Distanzsegmente, unten rechts hingegen keine. Eine vollständige Übersicht aller Perspektiven 1 bis 10 ist in Anhang B zu finden.

Azimutwinkel  $\neq 0^\circ$  verbessern bei konstantem Höhenwinkel die Auflösung in der Tiefe (Wickens et al., 1996). Da sich die Auflösung in der Tiefe als Winkelfunktion von Höhen- und Azimutwinkel ergibt, ist der Zuwachs an Auflösung durch die gleiche Azimutrotation bei Höhenwinkeln  $< 45^\circ$  stärker als bei Höhenwinkeln  $> 45^\circ$ . Es wurde deshalb erwartet, dass sich in den Tiefenurteilen Vorteile durch eine Azimutrotation nur mit den Höhenwinkeln

13° und 22.5°, aber nicht mit den Höhenwinkeln 45° und 67.5° einstellen. Der Höhenwinkel 90° liefert ohnehin eine maximale Auflösung in der Tiefe. Es wurde ein Azimutwinkel von 45° ausgewählt, weil sich mit Azimutrotationen < 45° bei zur 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten vergleichbar komplexen Anzeigen bisher außer bei Schreiber et al. (1998) keine signifikanten Leistungseinbußen feststellen ließen (Brown & Gallimore, 1995; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Wickens et al., 1996; Wickens & Prevett, 1995). 3D-Anzeigen in orthogonaler Parallelperspektive verwenden Azimutwinkel von 45°, um eine weitere Seite von 3D-Objekten darzustellen. Der Azimut 45° wurde mit einem Azimut von 0° verglichen, wobei letzterer sich nicht vom Blick in Fahrtrichtung unterscheidet.

Von den Distanzsegmenten wurde erwartet, dass diese als visuelle Hilfsmittel wirken, indem sie die Distanz zwischen den beiden Fahrzeugen in gleichmäßige Abschnitte unterteilen und dadurch die Tiefenwahrnehmung entlang der Sichtlinie erleichtern (vgl. Barfield & Rosenberg, 1995; Ellis et al., 1991; Hendrix & Barfield, 1997; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Park & Woldstad, 2000; Smallman et al., 2002).

In Anlehnung an die Ergebnisse von Experiment 1 wurden für die 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten aufgrund der ausreichenden Menge monokularer Tiefenkriterien keine Unterschiede zwischen monoskopischer und stereoskopischer 3D-Darstellung erwartet. Da sich in der Literatur Vorteile der stereoskopischen Disparität für die Tiefenwahrnehmung vor allem dann zeigten, wenn in den 3D-Anzeigen keine visuellen Hilfsmittel enthalten waren (Grossman & Balakrishnan, 2006; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Park & Woldstad, 2000), wurde erwartet, dass die stereoskopische Darstellung in den Anzeigen ohne Distanzsegmente durchaus überlegen sein könnte. Des Weiteren wurde angenommen, dass die stereoskopische Disparität insbesondere in ungünstigen Perspektiven mit geringer Auflösung in der Tiefe (in Experiment 2: Höhenwinkel 13° und 22.5° mit Azimutwinkel 0° und 45°) von Vorteil ist (vgl. Barfield & Rosenberg, 1995; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Yeh & Silverstein, 1992). Da sich in Experiment 1 die Qualität der stereoskopischen Darstellung des verwendeten ASD noch nicht als ausreichend erwiesen hatte und in der Zwischenzeit kein verbessertes ASD zur Verfügung stand, wurde in Experiment 2 auf den Einsatz eines ASD verzichtet. Stattdessen wurde wie bereits in Experiment 1 eine stereoskopische Darstellung mit Hilfe einer Shutterbrille als Referenz für hochwertige stereoskopische Anzeigen verwendet, um potenzielle Vorteile einer optimalen stereoskopischen Darbietung für die räumliche Tiefenwahrnehmung abschätzen zu können.

Zusammenfassend wurden in Experiment 2 die Faktoren *Höhenwinkel* (13°, 22.5°, 45°, 67.5°, 90°), *Azimut* (0°, 45°), *Display* (Mono, Stereo) und *Segmente*

(ohne, mit) untersucht. Für die Versuchsreize wurde eine 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten verwendet. Als konkretes Beispiel einer Anzeige für Fahrerassistenzsysteme sollte diese eine Anwendung der Ergebnisse auf andere 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme ermöglichen. Gleichzeitig war sie einfach und allgemein genug gehalten, um die Ergebnisse auf andere Anwendungsgebiete übertragen zu können.

Die Versuchsaufgabe bestand darin, in statischen 3D-Anzeigen, die auf einem PC-Monitor dargeboten wurden, Distanzen zwischen zwei Fahrzeugen entlang der Sichtlinie zu schätzen. Derartige Urteile über das Ausmaß räumlicher Tiefe sind in 3D-Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen erforderlich und wurden bereits in zahlreichen Grundlagenuntersuchungen zur Operationalisierung der Tiefenwahrnehmung verwendet (z.B. Banton et al., 2001; Bruno & Cutting, 1988; Ichikawa & Saida, 1996; Smallman et al., 2002; Wartenberg & Wiborg, 2003). Distanzschätzungen in der Tiefe sind über eine direkte Skalierung am unaufwendigsten zu erheben. Außerdem sind vergleichbare Ergebnisse wie bei Unterschiedlichkeitsratings oder bei Paarvergleichen zweier Distanzen zu erwarten (Bruno & Cutting, 1988). Konkret wurden die einfacher durchzuführenden direkten Skalierungen über arithmetische Schätzungen (Wie viel Meter sind zwei Objekte voneinander entfernt?) verwendet, auch wenn diese zu etwas ungenaueren räumlichen Urteilen führen als direkte Skalierungen über Handlungen im Raum (*depth-matching*: Positionieren Sie in der 3D-Anzeige ein Messobjekt in der Tiefe, in welcher Sie das Zielobjekt sehen) (Cutting & Vishton, 1995). Arithmetische Schätzungen können entweder visuell-motorisch (z.B. mechanischer oder virtueller Schieberegler wird auf einer Skala positioniert) oder verbal (z.B. Zahl von 0-100 nennen) abgegeben werden. In Experiment 2 wurde ein mechanischer Schieberegler eingesetzt, da somit eine Vorstufe der Umsetzung des Distanzurteils in reales Abstandsverhalten abgeprüft wurde und zudem diese Art der arithmetischen Schätzung den Probanden leichter fallen dürfte. Die Distanzen wurden nicht absolut in Metern, sondern relativ zu einer maximalen Gesamtstrecke in Prozent geschätzt. Da die Richtung der Distanzschätzfehler (über- oder unterschätzen) nicht interessierte und die Fehler auch nicht mit der zu schätzenden Distanz gewichtet werden sollten, wurden als abhängige Variablen der Betrag der Abweichung der geschätzten von der tatsächlichen Distanz und die Reaktionszeiten erhoben (ausführlicher in Häring, 2004).

Außerdem wurden die subjektiven Bewertungen der Perspektiven und der Displays zur Nützlichkeit und zur Attraktivität der Anzeigen bei der Ausführung von Distanzschätzungen über Rangreihen erfragt (s. Anhang B, Tab. B-10 und B-11). Diese haben gegenüber Ratingskalen den Vorteil, Entscheidungen zwischen den Anzeigen zu forcieren.



Im Einzelnen wurden folgende Hypothesen überprüft:

- **Hypothese 1a:** Je größer der Höhenwinkel, desto genauer und schneller sind die Tiefenurteile. Bei Höhenwinkeln  $< 45^\circ$  ist der Anstieg steiler als bei Höhenwinkeln  $> 45^\circ$ .
- **Hypothese 1b:** Mit dem Azimutwinkel  $45^\circ$  sind in Kombination mit den Höhenwinkeln  $13^\circ$  und  $22.5^\circ$  die Tiefenurteile genauer und schneller als mit dem Azimutwinkel  $0^\circ$ . Für die Höhenwinkel  $45^\circ$  und  $67.5^\circ$  zeigt sich dieser Unterschied nicht.
- **Hypothese 2:** Distanzsegmente wirken als visuelle Hilfsmittel und verbessern die Genauigkeit und die Geschwindigkeit von Distanzurteilen.
- **Hypothese 3a:** Eine stereoskopische Darstellung verbessert die Genauigkeit und die Geschwindigkeit von Distanzurteilen, wenn keine Distanzsegmente als visuelle Hilfsmittel in der Anzeige enthalten sind.
- **Hypothese 3b:** Eine stereoskopische Darstellung verbessert die Genauigkeit und die Geschwindigkeit von Distanzurteilen in Perspektiven mit einer geringen Auflösung in der Tiefe (Höhenwinkel  $13^\circ$  und  $22.5^\circ$  mit Azimutwinkel  $0^\circ$  und  $45^\circ$ ).

## 8.2 Methode

### 8.2.1 Versuchsplan

Es wurde ein varianzanalytischer Versuchsplan mit Messwiederholung auf allen vier Faktoren angewendet (s. Tab. 8-1). Der Faktor *Höhenwinkel* wurde fünfstufig realisiert ( $13^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $90^\circ$ ). Der Faktor *Azimut* hatte zwei Stufen ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ), ebenso wie die Faktoren *Display* (Mono, Stereo) und *Segmente* (ohne, mit). Durch die Kombination der Faktoren *Höhenwinkel* und *Azimut* entstanden zehn Perspektiven (s. Anhang B, Abb. B-1). Alle Faktoren wurden vollständig kombiniert. Die Versuchsreize wurden in zwei Blöcken für den Faktor *Segmente* und innerhalb dieser in zwei Blöcken für den Faktor *Display* gezeigt. In jedem der vier Blöcke *Segmente* x *Display* wurden zehn Perspektiven gezeigt und in jeder Perspektive zehn Distanzen geschätzt (s. Anhang B, Tab. B-2). Die Reihenfolgen der Blöcke wurden vollständig permutiert. Die Reihenfolgen der Perspektiven und Distanzen wurden randomisiert. Abhängige Variablen waren der Betrag der Abweichung der geschätzten von der tatsächlichen Distanz in Prozent, die Reaktionszeit in Millisekunden, die mittleren Rangplätze der subjektiven Bewertung der Perspektiven und die Häufigkeiten in der Bevorzugung einer Displayvariante.

**Tabelle 8-1: Versuchsplan für Experiment 2**

Segmente =>			ohne Segmente		mit Segmenten	
Display =>			Mono	Stereo	Mono	Stereo
Azimut	Höhenwinkel	Perspektive				
0°	13°	P1	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
	22.5°	P2	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
	45°	P3	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
	67.5°	P4	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
	90°	P5	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
45°	13°	P6	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
	22.5°	P7	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
	45°	P8	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
	67.5°	P9	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
	90°	P10	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>

Anmerkung: N<sub>1</sub> ist eine Stichprobe.

### 8.2.2 Versuchsteilnehmer

Am Experiment 2 nahmen 16 Versuchspersonen teil. Ein Proband wurde aus den statistischen Analysen ausgeschlossen, weil er die Instruktionen missachtete. Die verbleibenden 7 Frauen und 8 Männer hatten ein durchschnittliches Alter von 27.9 Jahren ( $SD = 5.56$ , 22 bis 41 Jahre) und nach eigenen Angaben eine normale oder auf normal korrigierte Sechstärke. Acht Teilnehmer trugen während des Versuches eine Sehhilfe. Die stereoskopische Sehfähigkeit wurde mit zwei Versuchsreizen mit positiver und negativer Disparität qualitativ überprüft. Da alle Teilnehmer Angestellte der Daimler AG waren, wurde keine Aufwandsentschädigung gezahlt.

### 8.2.3 Apparatur

Das Experiment fand im März 2004 in einem Versuchslabor der Daimler AG in Stuttgart-Untertürkheim statt. Der Versuchsaufbau war identisch mit Experiment 1 (s. Abb. 8-2). Alle Abweichungen werden im Folgenden berichtet. Als Anzeigefläche wurde die gesamte Bildschirmgröße des 17 Zoll Monitors genutzt. Die Probanden gaben ihre Distanzschätzungen mit Hilfe eines Schiebereglers ab (s. Abb. 8-2), den sie sich so positionieren konnten, dass er bequem zu bedienen und ohne zusätzliche Kopfbewegungen zu sehen war. Der Schieberegler bestand aus einem mechanischen Regler (Fa. Alps Electric, Widerstand 10 k $\Omega$ ) für die Auswahl einer Distanz und einem Drucktaster für die Bestätigung der Eingabe. An beiden Anschlägen waren Markierungen angebracht (0% bzw. 100%). Die Reaktionszeiten und Distanzschätzwerte wurden in Zyklen von 100 Hz aufgezeichnet. Wenn die maximale Darbie-

tungszeit der Versuchsreize von 5 s überschritten war, wurde ein Missing eingetragen, was zweimal vorkam.



**Abbildung 8-2: Versuchsaufbau für Experiment 2**

Die linke Abbildung informiert über den Versuchsaufbau mit PC-Monitor für die Versuchsleiterin, Shutterbrille, Kinnstütze, Schieberegler und PC-Monitor für die Probanden, die rechte zeigt den Schieberegler.

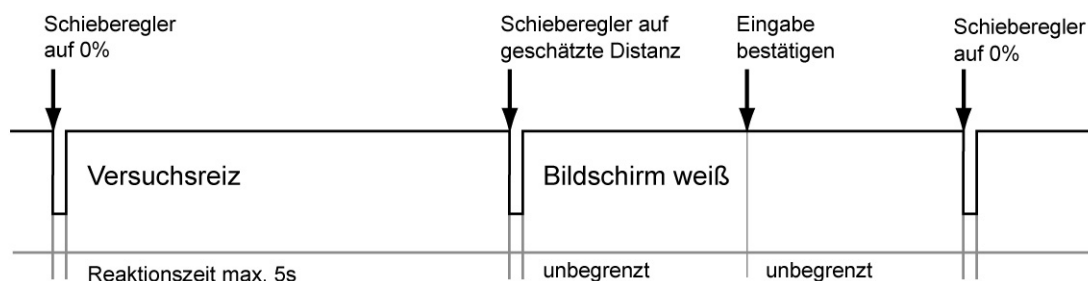
#### 8.2.4 Versuchsreize

Als Versuchsmaterial wurde eine 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten verwendet (s. Abb. 8-1). Diese wurde durch eine weiße Linie ergänzt, die die maximal zu schätzende Distanz darstellte. Die Anzeigen variierten in der verwendeten Perspektive und darin, ob Distanzsegmente dargestellt waren oder nicht. Die maximale Distanz zwischen den Fahrzeugen wurde auf 100 Displayeinheiten (DEH) normiert. Auf dieser Strecke wurden maximal sechs Distanzsegmente gleicher Tiefe dargestellt. Die Fahrzeuge (107 DEH) waren im Verhältnis zur Distanz zwischen den Fahrzeugen stark vergrößert.

Die virtuelle Kamera war bei maximaler Distanz auf die Mitte zwischen den Fahrzeugen gerichtet. Die Distanz der virtuellen Kamera zu diesem Punkt betrug 86 DEH. Nur für den Höhenwinkel  $13^\circ$  musste die Distanz auf 24 DEH gekürzt werden, damit die Perspektive aus der Position des Fahrers aufgenommen werden konnte. Der vertikale Kameraöffnungswinkel betrug  $18.7^\circ$  und entsprach dem Blickwinkel der Versuchspersonen auf den 70 cm entfernten PC-Monitor mit einer Bildhöhe von 23.7 cm. Die Stereoparameter und Disparitäten sind in Anhang B in Tabelle B-1 aufgeführt. Die zehn Distanzen für die Schätzung (s. Anhang B, Tab. B-2) wurden folgendermaßen festgelegt: a) Ausnutzung des gesamten Wertebereiches, b) unregelmäßige Verteilung, c) mittlerer Abstand über alle Distanzen ca. 50% und d) Variation der Distanz des vorausfahrenden Fahrzeugs zum nächsten Segment. Obwohl zur Kontrolle des Einflusses der Größe der Distanzen auf die Distanzschätzung in allen Perspektiven die gleichen 10 Distanzen geschätzt wurden, erhielten die Probanden die Information, dass zufällige Distanzen auftreten.

### 8.2.5 Durchführung und Versuchsaufgabe

Das Experiment dauerte mit jedem Probanden ungefähr eine Stunde und 30 Minuten. Zunächst wurden die Probanden über Inhalt und Ablauf des Versuches informiert. Sie füllten einen demographischen Fragebogen aus und führten einen Test zum stereoskopischen Sehen durch. Danach wurden mit Hilfe von geeigneten Übungsreizen der Inhalt der Anzeigen, die Variation der Anzeigen im Versuch und die Versuchsaufgabe erläutert. Die Versuchsaufgabe bestand darin, mit Hilfe einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten auf einem PC-Monitor Distanzen zwischen zwei Fahrzeugen mit einem mechanischen Schieberegler sowohl schnell als auch genau zu schätzen. Die Bedienung des Schiebereglers wurde erklärt und so lange geübt, bis sie richtig und sicher ausgeführt wurde. Anschließend wurden mit den Bedingungen des ersten Versuchsblocks und mit einer Perspektive, die nicht in den Experimentaldurchgängen vorkam (P11: 22° Azimut, 30° Höhenwinkel) vier Übungsdurchgänge mit jeweils zehn Distanzen durchgeführt. Nach jedem Wechsel in den Bedingungen der Faktoren *Segmente* oder *Display* wurden zur Gewöhnung an die neue Bedingung zwei Übungsdurchläufe mit der Perspektive 11 ausgeführt. Außerdem wurde nach jedem Wechsel der Perspektive zu Beginn eines Experimentaldurchgangs eine zusätzliche Übungsdistanz zur Gewöhnung an die neue Perspektive dargeboten, die nicht ausgewertet wurde.



**Abbildung 8-3: Schematischer Ablauf einer Distanzschätzung für Experiment 2**

Abbildung 8-3 zeigt den Ablauf einer Distanzschätzung. Den ersten Versuchsreiz einer Bedingung startete die Versuchsleiterin. Jeden nächsten Versuchsreiz löste der Proband dadurch aus, dass er den Schieberegler zurück auf die Markierung 0% bewegte. Ein Versuchsreiz verblieb so lange auf dem Monitor, bis der Proband durch die Auslenkung des Schiebereglers die Eingabe des Tiefenurteils begann, maximal aber für 5 s. Die Probanden waren instruiert, den Schieberegler erst dann zu betätigen, wenn sie in ihrem Urteil sicher sind. Bei erster Auslenkung des Schiebereglers wurde die Reaktionszeit festgehalten, der letzte Versuchsreiz verschwand und der Bildschirm wurde weiß. Die

Probanden platzierten den Schieberegler entsprechend ihres Tiefenurteils und bestätigten ihre Eingabe mit der Taste. Nach dem experimentellen Versuchsteil wurden die subjektiven Bewertungen der Nützlichkeit und der Attraktivität der Perspektiven und der Displays abgefragt (s. Anhang B, Tab. B-10 und B-11).

### 8.3 Ergebnisse

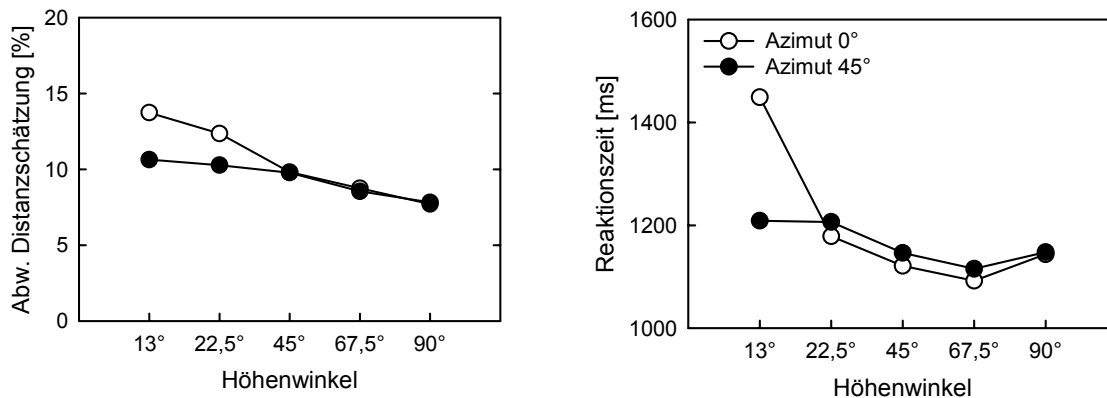
Aus allen Reaktionen der Probanden wurden für jede Bedingung sowohl die mittleren Beträge der Abweichungen der geschätzten von den tatsächlichen Distanzen als auch die mittleren Reaktionszeiten ermittelt. Anhand der absoluten Abweichungen konnte festgestellt werden, dass die Probanden die Distanzen minimal (2%) unterschätzten. Für die Abweichungen der Distanzschätzungen und für die Reaktionszeiten wurden je eine univariate vierfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung auf den Faktoren *Höhenwinkel*, *Azimut*, *Display* und *Segmente* gerechnet. Die statistischen Analysen wurden identisch zu Experiment 1 durchgeführt. Die Normalverteilungsannahme wurde in 4 von 80 Variablen nicht bestätigt. Da die entsprechenden parameterfreien Verfahren keine abweichenden Ergebnisse erbrachten, werden auch in diesen vier Fällen die Ergebnisse der parametrischen Verfahren berichtet. Für die Auswertung der Rangreihe zur subjektiven Bewertung der Nützlichkeit und der Attraktivität wurden der Friedmann-Test und der Wilcoxon-Test eingesetzt, für die Auswertung der Häufigkeit der Bevorzugung einer Displayvariante der  $\chi^2$ -Test. Die Ergebnisse wurden wegen der Anschaulichkeit auch für kategoriale unabhängige Variablen in Liniendiagrammen dargestellt. Die statistischen Kennwerte sind in Anhang B in den Tabellen B-3 bis B-9 zu finden.

#### 8.3.1 Höhenwinkel und Azimut

Für den Faktor *Höhenwinkel* erbrachten die Varianzanalysen signifikante Effekte sowohl für die Abweichung der Distanzschätzung,  $F(4, 56) = 31.33, p < .001$ ; als auch für die Reaktionszeiten,  $F(4, 56) = 15.95, p < .001$ . Erwartungsgemäß zeigten sich mit größer werdendem Höhenwinkel kleinere Abweichungen in der Distanzschätzung und schnellere Reaktionen (s. Abb. 8-4). Die mittleren Abweichungen der Distanzschätzung betrugen  $H_{13} = 12.2\%$ ,  $H_{22.5} = 11.3\%$ ,  $H_{45} = 9.8\%$ ,  $H_{67.5} = 8.7\%$  und  $H_{90} = 7.8\%$ . Der Unterschied zwischen den Höhenwinkeln  $13^\circ$  und  $22.5^\circ$  war tendenziell signifikant. Alle anderen Unterschiede zwischen benachbarten Höhenwinkeln erreichten das 1%-Niveau. Die mittleren Reaktionszeiten betrugen  $H_{13} = 1329$  ms,  $H_{22.5} = 1193$  ms,  $H_{45} = 1134$  ms,  $H_{67.5} = 1104$  ms und  $H_{90} = 1146$  ms. Die Unterschiede zwischen den Höhenwinkeln  $13^\circ$  und  $22.5^\circ$  wurden auf dem 1%-Niveau und zwischen den Höhenwinkeln  $22.5^\circ$  und  $45^\circ$  tendenziell signifikant. Der leichte - aber nicht signifikante - Anstieg in den Reaktionszeiten des Höhenwin-

kels  $90^\circ$  steht einer signifikanten Verbesserung der Genauigkeit der Distanzschätzung gegenüber.

Für den Faktor *Azimet* gab es einen signifikanten Haupteffekt in der Abweichung der Distanzschätzung,  $F(1, 14) = 17.56, p < .001$ ; nicht aber für die Reaktionszeiten  $F(1, 14) < 1$ . Wie erwartet traten mit dem Azimutwinkel  $45^\circ$  ( $M = 9.4\%$ ) kleinere Abweichungen in der Distanzschätzung auf als mit dem Azimutwinkel  $0^\circ$  ( $M = 10.5\%$ ). Die mittleren Reaktionszeiten betrugen  $A45 = 165$  ms und  $A0 = 1197$  ms.



**Abbildung 8-4: Ergebnisse Höhenwinkel x Azimet für Experiment 2**

Die linke Abbildung informiert über die Genauigkeit der Distanzschätzung als Funktion der Faktoren *Höhenwinkel* x *Azimet*. Die Genauigkeit der Distanzschätzung wird als Betrag der Abweichung des Schätzwertes vom tatsächlichen Wert angegeben. 100% entsprechen der maximal zu schätzenden Distanz. Rechts sind die Reaktionszeiten als Funktion der Faktoren *Höhenwinkel* x *Azimet* dargestellt. ( $N = 15$ ).

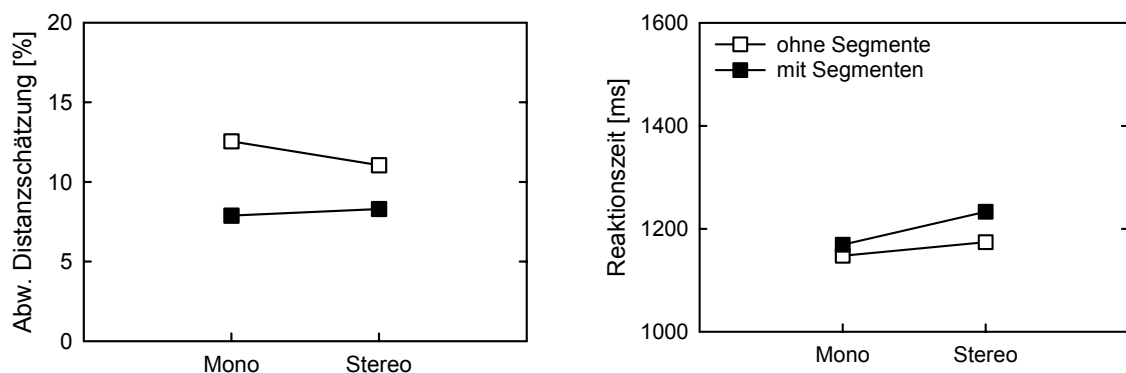
Die Wechselwirkung zwischen den Faktoren *Höhenwinkel* und *Azimet* wurde wie erwartet sowohl für die Abweichung der Distanzschätzung,  $F(4, 56) = 6.45, p < .01$ ; als auch für die Reaktionszeiten,  $F(4, 56) = 14.1, p < .001$ ; signifikant. Signifikante Vorteile der Azimetrotation von  $45^\circ$  gegenüber keiner Azimetrotation zeigten sich wie erwartet in der Abweichung der Distanzschätzung für die flachen Höhenwinkel  $13^\circ$  und  $22.5^\circ$ , wohingegen für die Höhenwinkel  $45^\circ$  und  $67.5^\circ$  keine Unterschiede existierten (s. Abb. 8-4). In den Reaktionszeiten zeigte sich der Vorteil der Azimetrotation von  $45^\circ$  gegenüber keiner Azimetrotation nur für den Höhenwinkel  $13^\circ$ . Insgesamt wurde damit bestätigt, dass eine Azimetrotation von  $45^\circ$  bei den flachen Höhenwinkeln  $13^\circ$  und  $22.5^\circ$  von Vorteil ist.

### 8.3.2 Stereoskopische Darstellung

Für den Faktor *Display* erbrachten die Varianzanalysen weder für die Abweichung der Distanzschätzung,  $F(1, 14) = 3.45, p < .1$ ; noch für die Reaktionszeiten,  $F(1, 14) < 1$ ; signifikante Effekte. Die Abweichung der Distanzschätzung war für die stereoskopische Darstellung ( $M = 9.7\%$ ) aber tendenziell geringer als für die monoskopische ( $M = 10.2\%$ ). Im Gegensatz

dazu waren die Reaktionszeiten für die monoskopische Darstellung ( $M = 1158$  ms) etwas schneller als für die stereoskopische ( $M = 1204$  ms). Insgesamt kann wegen dieses *speed-accuracy trade off* von keinen interpretierbaren Unterschieden zwischen den Displayvarianten gesprochen werden.

Eine signifikante Wechselwirkung zwischen den Faktoren *Display* x *Segmente* wurde für die Abweichung der Distanzschätzung gefunden,  $F(1, 14) = 9.37, p < .01$ ; für die Reaktionszeiten jedoch nicht,  $F(1, 14) < 1$  (s. Abb. 8-5). Ohne Segmente waren die Abweichungen der Distanzschätzung in der Stereo-Bedingung um 1.5% besser als in der monoskopischen. Mit Segmenten verkehrte sich dieser Unterschied ins Gegenteil und die monoskopische Darstellung war der stereoskopischen um minimale 0.4% überlegen. Die Reaktionszeiten waren sowohl mit als auch ohne Segmente in der stereoskopischen Darstellung geringfügig länger als in der monoskopischen. Insgesamt ergab sich der erwartete Vorteil der stereoskopischen Darstellung für die Anzeigen ohne Distanzsegmente nur in der Genauigkeit der Distanzschätzung, nicht jedoch in den Reaktionszeiten.



**Abbildung 8-5: Ergebnisse *Display* x *Segmente* für Experiment 2**

Die linke Abbildung informiert über die Genauigkeit der Distanzschätzung als Funktion der Faktoren *Display* x *Segmente*. Die Genauigkeit der Distanzschätzung wird als Betrag der Abweichung des Schätzwertes vom tatsächlichen Wert angegeben. 100% entsprechen der maximal zu schätzenden Distanz. In der rechten Abbildung sind die Reaktionszeiten als Funktion der Faktoren *Display* x *Segmente* dargestellt. ( $N = 15$ ).

Es fanden sich keine empirischen Belege für die Hypothese, dass die stereoskopische Darstellung in ungünstigen Perspektiven mit geringer Auflösung in der Tiefe (P1, P2, P6, P7) die Genauigkeit und Geschwindigkeit der Distanzschätzung stärker verbessert als in Perspektiven mit besserer Auflösung in der Tiefe (P3, P4, P5, P8, P9, P10). Da die Ergebnisse in allen Perspektiven vergleichbar waren, wurde keine der Wechselwirkungen *Display* x *Höhenwinkel* x *Azimut*, *Display* x *Höhenwinkel* sowie *Display* x *Azimut* für die Abweichungen der Distanzschätzung oder für die Reaktionszeiten signifikant.

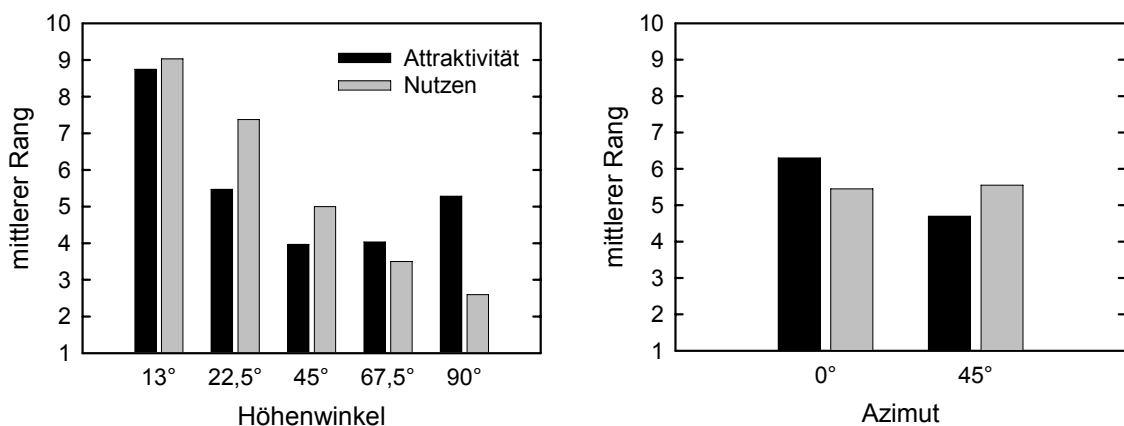




Bedingungen nicht unterschieden, aber die Distanzschätzungen wesentlich genauer waren, wird die Verwendung von Segmenten in ungünstigen Perspektiven empfohlen.

### 8.3.4 Subjektive Bewertung

Die Ergebnisse der subjektiven Bewertungen sind in Abbildung 8-7 dargestellt und die statistischen Kennwerte sind in Anhang B in den Tabellen B-6 bis B-9 zu finden. Die subjektive Einschätzung der Nützlichkeit der Anzeige für die Bewältigung der Distanzschätzaufgabe stimmte für den Faktor *Höhenwinkel* mit den objektiven Daten überein. Mit zunehmendem Höhenwinkel wurde die Nützlichkeit höher eingeschätzt,  $\chi^2(4, N = 15) = 37.10, p < .001$ . Jeder der Unterschiede zwischen den Höhenwinkeln war mindestens auf dem 5%-Niveau signifikant. Zwischen den Azimutwinkeln fand sich insgesamt ebenfalls in Übereinstimmung mit den objektiven Daten kein Unterschied in der Bewertung der Nützlichkeit,  $Z(N = 15) < 1$ ; aber in der Attraktivität. Der Azimutwinkel  $45^\circ$  wurde als signifikant attraktiver als der Azimutwinkel  $0^\circ$  eingeschätzt,  $Z(N = 15) = 2.23, p < .05$ . Die Höhenwinkel unterschieden sich ebenfalls in ihrer Attraktivität,  $\chi^2(4, N = 15) = 59.71, p < .001$ . Die Höhenwinkel  $45^\circ$  und  $67^\circ$  wurden als am attraktivsten bewertet, die Höhenwinkel  $22.5^\circ$  und  $90^\circ$  folgten darauf und am schlechtesten schnitt der kleinste Höhenwinkel  $13^\circ$  ab. Diese Unterschiede waren mindestens auf dem 5%-Niveau signifikant.



**Abbildung 8-7: Ergebnisse subjektive Bewertung für Experiment 2**

Die mittleren Rangplätze für die subjektive Bewertung der 10 Perspektiven hinsichtlich der Nützlichkeit für die Distanzschätzaufgabe und hinsichtlich der Attraktivität sind in der linken Abbildung in Abhängigkeit vom Höhenwinkel und in der rechten Abbildung in Abhängigkeit vom Azimutwinkel dargestellt. ( $N = 15$ ).

Die stereoskopische 3D-Darstellung fanden 11 der 15 Probanden attraktiver als die monoskopische,  $\chi^2(1, N=15) = 13.4, p < .01$ . Hinsichtlich der Nützlichkeit für die Bearbeitung der Versuchsaufgabe wurden beide Darstellungen ähnlich bewertet, sieben Probanden entschieden sich für die stereoskopische und acht für die monoskopische.

## 8.4 Diskussion

Experiment 2 diente der Überprüfung der Auswirkungen der Variation weiterer Gestaltungsparameter von 3D-Anzeigen auf die Tiefenwahrnehmung am Beispiel einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten. Von zentralem Interesse war die systematische Untersuchung des Einflusses der Verkürzung entlang der Sichtlinie aufgrund unterschiedlicher Perspektiven (Höhenwinkel  $13^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $67.5^\circ$ ,  $90^\circ$  x Azimutwinkel  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ) auf die Tiefenwahrnehmung. Anknüpfend an Experiment 1 wurde mit einer weiteren Anzeige und einer Distanzschätzungsaufgabe abgesichert, ob erneut keine Unterschiede zwischen monoskopischen und stereoskopischen Darstellungen in der Tiefenwahrnehmung existieren. Außerdem wurde die Wirkung von Distanzsegmenten auf die Tiefenwahrnehmung untersucht.

In den Ergebnissen des Experiments 2 war auffällig, dass meist nur die Abweichung der Distanzschätzung signifikante Effekte erbrachte, die die Hypothesen stützten, aber die Reaktionszeiten selten zu signifikanten Effekten und in einigen Fällen sogar zu einem *speed-accuracy trade-off* führten. Die Ursache dafür wird in der Erhebungsmethode vermutet. Die Probanden wurden zwar instruiert, den Schieberegler erst zu betätigen, wenn sie ihr Distanzurteil gefällt hatten. Möglicherweise kam es aber vor, dass einige Probanden zunächst den Schieberegler betätigten und erst danach ihr Distanzurteil endgültig fällten, auch wenn ihnen nach der ersten Auslenkung des Schiebereglers der Versuchsreiz nicht mehr zur Verfügung stand. Interessant wäre hier eine Auswertung der Zeiten zwischen der ersten Auslenkung des Schiebereglers und dem Drücken der Bestätigungstaste, die aber nicht aufgezeichnet wurden. Insgesamt ist in Experiment 2 die Abweichung der Distanzschätzung als das zuverlässigere Maß anzusehen.

Die Ergebnisse von Experiment 2 bestätigten die Hypothese 1a und die bereits in der Literatur gefundenen Nachteile der Verkürzung entlang der Sichtlinie für die Tiefenwahrnehmung (z.B. Barfield & Rosenberg, 1995; Smallman et al., 2002; Yeh & Silverstein, 1992). Mit einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten verschlechterten sich die Genauigkeit und die Geschwindigkeit von Tiefenurteilen mit abnehmendem Höhenwinkel. Der Anstieg war bei Höhenwinkeln  $< 45^\circ$  aber nicht steiler als bei Höhenwinkeln  $> 45^\circ$ , wie es - rein mathematisch gesehen - der trigonometrische Zusammenhang zwischen der Auflösung in der Tiefe und dem Höhenwinkel hatte vermuten lassen (Hickox & Wickens, 1999). Die Versuchsteilnehmer schätzten die Nützlichkeit einer Anzeige für die Distanzschätzung entsprechend den objektiven Daten als umso höher ein, je größer der Höhenwinkel war. Für die Verwendung von Höhenwinkeln  $> 45^\circ$  spricht außerdem, dass die Anzeigen mit den Höhenwinkeln  $45^\circ$

und  $67.5^\circ$  als besonders attraktiv und der Höhenwinkel  $13^\circ$  als eher unattraktiv eingestuft wurde. Letzteres widersprach der ursprünglichen Vermutung, dass flache egozentrische Höhenwinkel wegen ihrer Ähnlichkeit zur natürlichen Wahrnehmung von den Probanden besonders positiv bewertet werden. Für Aufgaben, in denen lediglich grobe Tiefenurteile erforderlich sind, können durchaus Höhenwinkel zwischen  $45^\circ$  und  $22.5^\circ$  verwendet werden, da die Einbußen im Vergleich zum Höhenwinkel mit den besten Ergebnissen in der Genauigkeit der Distanzschätzung für den Höhenwinkel  $22.5^\circ$  3.5% und in den Reaktionszeiten 89 ms betrugen.

Die Azimutrotation von  $45^\circ$  zeigte gegenüber keiner Azimutrotation - wie in Hypothese 1b erwartet - Vorteile in der Genauigkeit der Distanzschätzung für die Höhenwinkel  $13^\circ$  und  $22.5^\circ$ , in den Reaktionszeiten aber nur für den Höhenwinkel  $13^\circ$ . Für alle größeren Höhenwinkel erbrachte die Azimutrotation erwartungsgemäß keine Vorteile für die Tiefenwahrnehmung. Die Versuchsteilnehmer machten damit insgesamt übereinstimmend keine Unterschiede in der Bewertung der Nützlichkeit der beiden Azimutwinkel, aber sie fanden die Anzeigen mit Azimutrotation attraktiver als ohne. Deren größere Attraktivität ist mit großer Wahrscheinlichkeit auf die dadurch besser erkennbare Dreidimensionalität der dargestellten Objekte und auf die bessere Ausnutzung des Displayformates zurückzuführen.

Es fanden sich - wie bereits in Experiment 1 - keine eindeutigen Unterschiede zwischen monoskopischer und stereoskopischer Darstellung. Die Genauigkeit der Distanzschätzung war zwar in den stereoskopischen Anzeigen tendenziell besser, aber im Gegenzug waren die Reaktionszeiten geringfügig – wenn auch nicht signifikant – länger. Aufgrund dieses schwachen *speed-accuracy-trade off* wurde geschlussfolgert, dass es keine Unterschiede zwischen den Displayvarianten gab. In ihrer subjektiven Bewertung der Nützlichkeit machten die Versuchsteilnehmer ebenfalls keinen Unterschied zwischen monoskopischer und stereoskopischer Präsentation der 3D-Anzeigen, aber sie empfanden die stereoskopischen Anzeigen als attraktiver. Die signifikante Wechselwirkung der Faktoren *Display* x *Segmente* in der Genauigkeit der Distanzschätzung bestätigte Hypothese 3a dahingehend, dass nur dann ein geringer Vorteil der stereoskopischen Darstellung bestand, wenn keine Distanzsegmente angezeigt wurden. Dieses Ergebnis stimmte sowohl mit existierenden Studien (Grossman & Balakrishnan, 2006; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Park & Woldstad, 2000) als auch mit Experiment 1 überein, in welchem sich ein Vorteil der stereoskopischen Darstellung nur für die Bedingung mit den wenigsten monokularen Tiefenkriterien relative Größe und relative Höhe zeigte. Entgegen Hypothese 3b zeigte sich kein besonderer Vorteil der

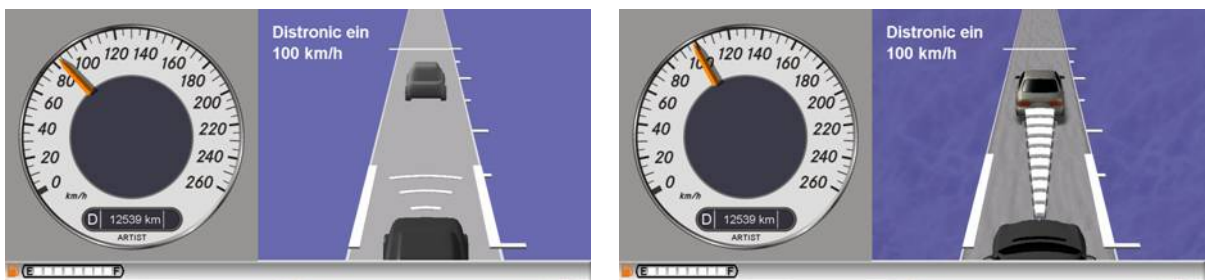
stereoskopischen Anzeigen in ungünstigen Perspektiven mit geringer Auflösung in der Tiefe.

Die Distanzsegmente verschlechterten die Genauigkeit und die Geschwindigkeit von Distanzurteilen in keiner der Bedingungen, sodass nicht davon ausgegangen werden muss, dass diese unnötig die visuelle Komplexität erhöhen. Erkennbare Vorteile von Distanzsegmenten waren davon abhängig, welcher Höhenwinkel in der 3D-Anzeige umgesetzt war und ob die Darstellung monoskopisch oder stereoskopisch erfolgte. Vorteile in der Genauigkeit der Distanzschätzung, wenn auch nicht in deren Geschwindigkeit, sprechen für die Verwendung von Distanzsegmenten in monoskopischen 3D-Anzeigen mit kleinen Höhenwinkeln ( $13^\circ$  und  $22.5^\circ$ ) und bestätigen damit Hypothese 2. In höheren Perspektiven bringen die Distanzsegmente keine Vorteile und können deshalb weggelassen werden.

**Zusammenfassung.** Bei der Ableitung von Empfehlungen zur Auswahl der Perspektive muss beachtet werden, dass in Experiment 2 der Einfluss der Verkürzung entlang der Sichtlinie isoliert untersucht wurde. Umfassende Aussagen darüber, welche Perspektive geeignet ist, wenn die Aufgabe nicht nur in einem Tiefenurteil besteht, sondern gleichzeitig einen Abgleich zwischen Anzeige und Umgebung erfordert, können erst anhand der Ergebnisse der Experimente 3, 4 und 5 getroffen werden. Das Zusammenführen der objektiven Daten und der subjektiven Bewertungen in Experiment 2 mündet in der Empfehlung, für Aufgaben ohne Abgleich und mit genauen Tiefenurteilen in 3D-Anzeigen einen Höhenwinkel zwischen  $45^\circ$  und  $67.5^\circ$  zu verwenden. Da bei diesen Höhenwinkeln eine Azimutrotation die Tiefenwahrnehmung nicht verbessert, kann die Wahl des Azimutwinkels hier von anderen Faktoren abhängig gemacht werden (z.B. Attraktivität der Anzeige, Hervorhebung des 3D-Charakters von Objekten, Ausnutzung des Displayformats). Sind nur grobe Tiefenurteile in einer 3D-Anzeige erforderlich und wird ein Vorteil flacher Höhenwinkel aufgrund einer möglichen Erleichterung des Abgleichs zwischen Anzeige und Umgebung erwartet, können durchaus Höhenwinkel zwischen  $45^\circ$  und  $22.5^\circ$  verwendet werden, weil sich hier die Einbußen in der Genauigkeit und Geschwindigkeit der Tiefenwahrnehmung sowie in der Bewertung der Attraktivität in einem akzeptablen Rahmen bewegen. Außerdem können bei Höhenwinkeln  $< 45^\circ$  Azimutrotationen und visuelle Hilfsmittel wie die Distanzsegmente eingesetzt werden, um die Tiefenurteile zu verbessern.

## 9 Entwicklung einer 3D-Anzeige für den Abstandsregeltempomaten

Unter Verwendung der Ergebnisse der Literaturanalyse und der Experimente 1 und 2 wurde in dieser Arbeit eine 3D-Anzeige für den Abstandsregeltempomaten entwickelt. Diese stellte den Ausgangspunkt für die Experimente 3, 4 und 5 dar, in welchen der Nutzen von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen hinsichtlich der erwarteten 3D-Vorteile räumliche Kompatibilität, Bildhaftigkeit und Attraktivität sowie deren Grenzen hinsichtlich der Wahrnehmungssicherheit und Ablenkungswirkung empirisch überprüft wurden. Zudem wurden in diesen Experimenten die Gestaltungsparameter Perspektive und autostereoskopische Anzeigen aufbauend auf den Experimenten 1 und 2 vertiefend untersucht.



Visuell einfache Anzeige

Visuell komplexe Anzeige

**Abbildung 9-1: Visuell einfache und visuell komplexe 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten für die Experimente 4 und 5**

**Visuelle Komplexität.** In Feldexperiment 3 wurde für einen Vergleich des unmittelbaren Verständnisses und der Akzeptanz von 2D- und 3D-Anzeigen ein maximaler Grad von visueller Komplexität umgesetzt, der für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen geeignet erschien (vgl. Abschn. 3.1.5 für eine Definition der visuellen Komplexität). Für die Experimente 4 und 5 wurde zusätzlich eine visuell einfache 3D-Anzeige realisiert, um den Einfluss der visuellen Komplexität auf die Wahrnehmungssicherheit, Ablenkungswirkung und Attraktivität von 3D-Anzeigen systematisch zu untersuchen. Die visuell einfache und die komplexe 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten für die Experimente 4 und 5 sind in Abbildung 9-1 dargestellt.

In der visuell einfachen Anzeige wurden ein abstraktes Fahrzeugmodell und wenige monokulare Tiefenkriterien verwendet. Die visuell komplexe Anzeige verkörpert einen höheren Grad an Realismus, wobei solche graphischen Details eingesetzt wurden, von denen ein Nutzen für die Tiefenwahrnehmung erwartet wurde. Es wurde davon ausgegangen, dass die Textur auf der Straße und die Schatten, welche alle 3D-Objekte auf den Untergrund werfen, als monokulare Tiefenkriterien wirken, die Distanzsegmente als visuelle Hilfsmittel die Distanzschätzung in der Tiefe erleichtern und die unregelmäßige Farbtextur des Hintergrundes den stereoskopischen Tiefeneindruck

intensiviert. Lediglich das detaillierte Fahrzeugmodell diene ausschließlich einer Attraktivierung der Anzeige.

Die Grundausswahl **monokularer Tiefenkriterien** bestand in allen Anzeigen aus der relativen Größe, relativen Höhe, linearen Perspektive und einem einfachen Lichtmodell mit einer diffusen Lichtquelle von oben und den sich daraus ergebenden Helligkeitsverläufen an den Objekten. In Experiment 1 erwies sich diese Auswahl als ausreichend, um eine stabile räumliche Tiefenwahrnehmung herzustellen. Die Grundausswahl monokularer Tiefenkriterien wurde in der visuell komplexen Anzeige durch Texturen und Schatten ergänzt sowie durch das Tiefenkriterium Verdeckung, sobald Distanzsegmente enthalten waren.

**Autostereoskopische Displays (ASD)** mit Linsen- bzw. Barrierenmasken wurden als geeignete Technologien für einen Einsatz im Fahrzeug ausgewählt (s. Abschn. 5.4.2). Die Entscheidung für ein ASD mit Linsenmaske in Experiment 5 wurde aufgrund der negativen Wahrnehmungseffekte des ASD mit Barrierenmaske in Experiment 1 gefällt. Aus Gründen des technischen Aufwands wurde das ASD nicht mit einem Headtracking gekoppelt, sodass der Bewegungsbereich des Kopfes nur  $\pm 3$  cm betrug. Das ASD ersetzte das Kombiinstrument und war nur für den Fahrer einsehbar. Die technischen Daten sind im Experiment 5 nachzulesen. Die Gestaltungshinweise aus Abschnitt 5.4.4 wurden angewendet.

Die **geometrischen Parameter der virtuellen Szene** wurden wie folgt umgesetzt: Die Distanzen zwischen den Fahrzeugen wurden im Vergleich zur Realität verringert, um auf der 13.2 cm x 9.9 cm großen Anzeige das vorausfahrende Fahrzeug auch bei maximaler Distanz gut erkennen zu können. Im ersten Entwurf der Anzeige, welcher in Experiment 2 verwendet wurde, war die Distanz stark verringert (1:20), sodass sie auf jeden Fall als künstlich verändert empfunden wurde. Im Fahrzeug bewährte sich diese extreme Verringerung nicht, weil übliche Distanzveränderungen während der Fahrt kaum zu erkennen waren und sich die Größe des vorausfahrenden Fahrzeugs relativ zur Außensicht bei unterschiedlichen Distanzen zu wenig veränderte. In den Anzeigen der Experimente 3, 4 und 5 wurden die Distanzen deshalb im Verhältnis 1:7.5 verkleinert. Zudem wurden hier Kameraöffnungswinkel verwendet, die größer als der Blickwinkel des Betrachters auf das Display waren, um die Szene trotz geringer Distanzen optisch zu dehnen (s. Abschn. 5.5). Beide Maßnahmen waren so aufeinander abgestimmt, dass sich die Größe des vorausfahrenden Fahrzeugs in der Realität und in der Anzeige in Abhängigkeit von der Distanz vergleichbar verändert, d.h. nahezu gleiche Sehwinkel beansprucht. Dadurch war die künstliche Verringerung der Distanzen in der Anzeige jedoch nicht mehr sofort erkennbar. Um Fehlein-

schätzungen absoluter Distanzen zu verhindern, wurde in den Anzeigen der Experimente 4 und 5 eine Skala mit Meterangabe eingefügt. In den Anzeigen aus Experiment 3 fiel den Probanden unangenehm auf, dass besonders beim Höhenwinkel  $15^\circ$  die hinteren Segmente so schmal waren, dass sie kaum noch zu erkennen waren. Dieser Effekt wurde durch den größeren Kameraöffnungswinkel verursacht, der die perspektivische Konvergenz in der Tiefe verstärkte. Daraufhin wurde in den Anzeigen der Experimente 4 und 5 dieser Effekt ausgeglichen, indem die Segmenttiefe mit zunehmender Entfernung vergrößert wurde. Der maximale Korrekturfaktor 3.2 entsprach dem Unterschied im Sinus des Kameraöffnungswinkels zwischen dem ersten und letzten Segment, gemittelt über die Anzeigen mit  $15^\circ$  und  $22.5^\circ$  Höhenwinkel.

Es wurden zwei **Perspektiven** gewählt, die einen Kompromiss zwischen dem Abgleich von 3D-Anzeige und Außensicht und der Auflösung in der Tiefe darstellen:  $22.5^\circ$  und  $45^\circ$  Höhenwinkel (s. Abschn. 5.6 und Ergebnisse aus Experiment 2). Außerdem wurde ein im Vergleich zur Fahrerperspektive nur geringfügig größerer Höhenwinkel von  $15^\circ$  verwendet, um eine optimale Wirkung des ASD zu erzielen (s. Abschn. 5.4.4). Trotz potenzieller Vorteile einer Azimutrotation wurde ein Azimutwinkel von  $0^\circ$  gewählt, der mit der Sicht des Fahrers aus dem Fahrzeug übereinstimmte, da in einem Vorversuch zu Experiment 3 abweichende Azimutwinkel während der Fahrt als sehr störend empfunden wurden.

Zur Wahl des **Bezugsrahmens** in der Anzeige stellte sich die Frage: Welches Fahrzeug wird als bewegt dargestellt, das eigene oder das vorausfahrende? Roscoe's (1968) *principle of the moving part* und *principle of pictorial realism* führen zu gegensätzlichen Empfehlungen. Ersteres besagt, dass Anwender immer den Teil einer Anzeige zu kontrollieren glauben, der sich bewegt. Danach sollte sich das eigene Fahrzeug bewegen, damit keine Fehlbedienungen in die entgegen gesetzte Richtung ausgeführt werden, wie dies in Flugzeugen bei der Nutzung des *attitude indicators* nachgewiesen wurde (Roscoe, 2004). Das *principle of pictorial realism* empfiehlt hingegen, in Anzeigen ein Abbild des mentalen Modells oder der realen Sicht darzustellen. Danach sollte sich das vorausfahrende Fahrzeug bewegen, weil sich gewöhnlich der Fahrer selbst als statisch und die Umwelt als bewegt erlebt (egozentrischer *inside-out* Bezugsrahmen). Die Vorteile der zweiten Variante überwiegen, da aufgrund der konstanten Anordnung der Fahrzeuge nahezu ausgeschlossen ist, dass sich der Fahrer mit dem bewegten vorausfahrenden Fahrzeug verwechselt und deswegen in einer Auffahrsituation Gas gibt, anstelle zu bremsen.

Als **visuelle Hilfsmittel** wurden Distanzsegmente für eine Unterstützung der Distanzschätzung in der Tiefe verwendet. Diese unterteilten die Distanz

zwischen dem eigenen und dem vorausfahrenden Fahrzeug in gleichmäßige Abschnitte. An den Segmenten wirken alle monokularen Tiefenkriterien, sodass sich die Tiefenwahrnehmung in der gesamten Szene verbessern sollte. In den Anzeigen des Experiments 2 wurden sechs Segmente, in denen der Experimente 3, 4 und 5 wegen der größeren Distanzen hingegen 20 Segmente dargestellt. Zusätzlich zu den Segmenten wurde eine Skala eingefügt, um grobe absolute Distanzschätzungen zu ermöglichen.



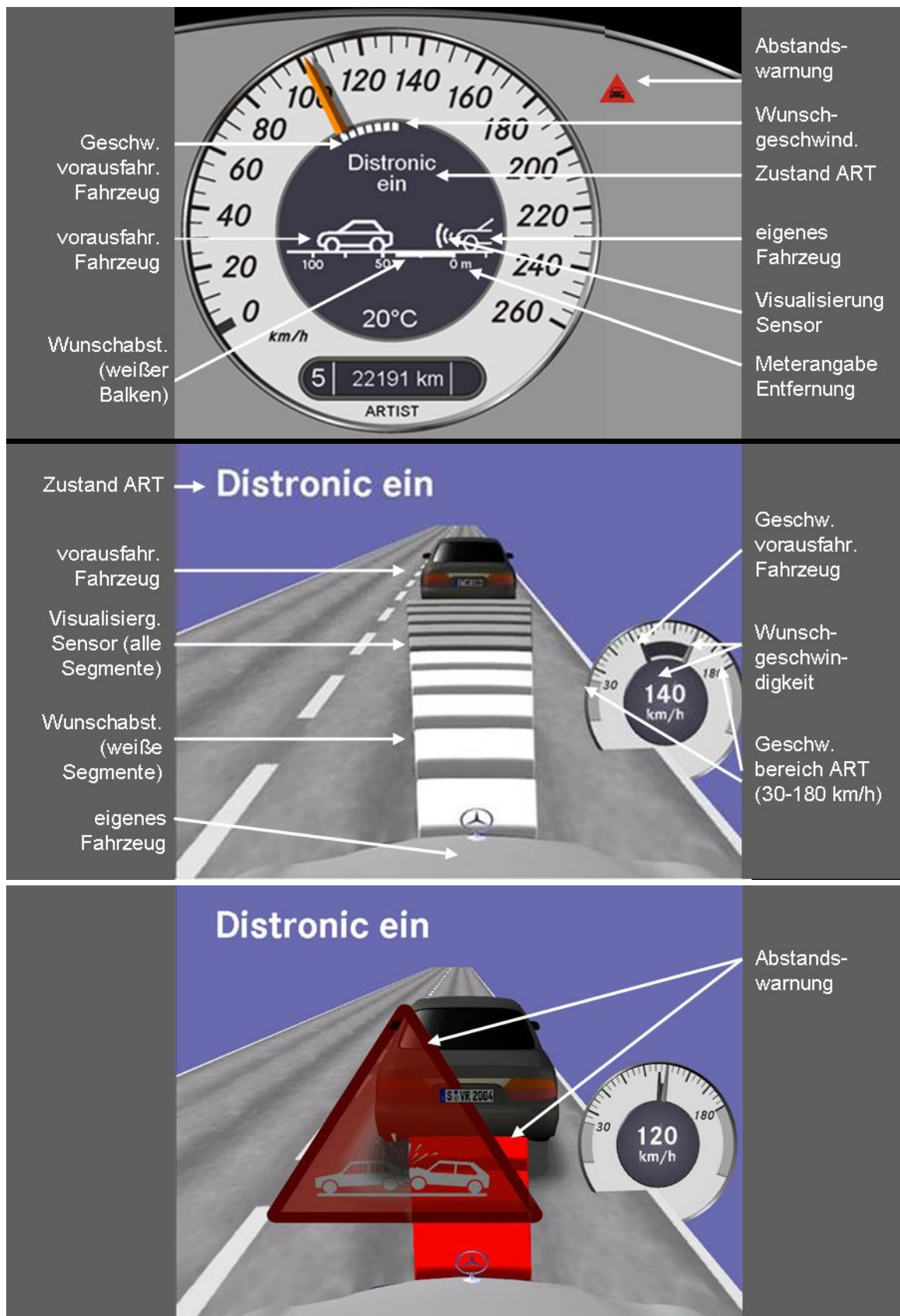
## **10 Experiment 3 – Vergleich von 2D- und 3D- Anzeigen des Abstandsregeltempomaten im Straßenverkehr**

### **10.1 Fragestellung und Hypothesen**

Nachdem mit Hilfe der Experimente 1 und 2 Gestaltungshinweise für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen zusammengetragen und bei der Umsetzung einer 3D-Anzeige des ART angewendet wurden, dienten die folgenden Experimente 3, 4 und 5 der Überprüfung, ob sich die erwarteten Vorteile der 3D-Anzeige des ART im Vergleich zu einer 2D-Anzeige tatsächlich nachweisen lassen und ob Grenzen bezüglich der Wahrnehmungssicherheit und Ablenkungswirkung bestehen. Diese Experimente wurden sowohl für 3D-Anzeigen auf konventionellen Displays als auch auf ASD unter realitätsnahen Bedingungen in Feld- und Fahrsimulatorexperimenten mit Mercedes-Kunden durchgeführt.

In Experiment 3 wurde den Fragen nachgegangen, ob eine monoskopische 3D-Anzeige auf einem konventionellen Display das unmittelbare Verständnis (3D-Vorteil Bildhaftigkeit) und die Akzeptanz (3D-Vorteil Attraktivität) der Anzeige des ART im Vergleich zu einer gegenwärtig in Serienfahrzeugen der Marke Mercedes-Benz verwendeten 2D-Anzeige fördert. Ein besseres unmittelbares Verständnis wurde aufgrund der größeren Bildhaftigkeit und eine höhere Akzeptanz aufgrund der größeren Attraktivität der 3D-Anzeige erwartet (vgl. Abschn. 4.4). Da wegen der Messung der Akzeptanz realitätsnahe Anwendungsbedingungen erforderlich waren, wurde ein Feldexperiment mit einer Fahrt im normalen Straßenverkehr durchgeführt. Dieses war als Prototypenvergleich angelegt, sodass ausgehend von einer in Serienfahrzeugen eingesetzten 2D-Anzeige mögliche Vorteile einer 3D-Anzeige abgeschätzt werden konnten (s. Abb. 10-1). Der Prototypenvergleich brachte jedoch mit sich, dass sich die 2D- und 3D-Anzeigen nicht nur in ihrer Dimensionalität, sondern auch in einigen Details der graphischen Darstellung unterschieden. Da zum Zeitpunkt der Untersuchung kein fahrzeugtaugliches ASD zur Verfügung stand, kam in Experiment 3 lediglich eine monoskopische 3D-Anzeige zum Einsatz. Die erwarteten 3D-Vorteile räumliche Kompatibilität und Attraktivität, die Wahrnehmungssicherheit und die Ablenkungswirkung wurden in den nachfolgenden Experimenten 4 und 5 unter kontrollierten Bedingungen mit 3D-Anzeigen auf einem konventionellen Display und auf einem ASD geprüft.

Aufgrund der größeren Bildhaftigkeit von 3D-Anzeigen wurde erwartet, dass das unmittelbare Verständnis einer Funktion und der dazugehörigen Anzeige im Vergleich zu weniger bildhaften 2D-Anzeigen gesteigert wird (s. Abschn. 3.1.5). Diese Hypothese wurde in Experiment 3 anhand des Vergleichs einer 2D- und einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten überprüft. Die beiden Anzeigen sind in Abbildung 10-1 dargestellt.



**Abbildung 10-1: Anzeigen für Experiment 3**

In der oberen Abbildung ist die 2D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten (ART), in der mittleren die 3D-Anzeige und in der unteren die Abstandswarnung der 3D-Anzeige dargestellt.

Das unmittelbare Verständnis wurde zu Beginn des Experiments bei Probanden, welche die Funktion und die Anzeige des Abstandsregeltempomaten noch nicht kannten, erfragt. Es wurden 14 offene Fragen zur Funktionalität des Systems, zu den einzelnen Bestandteilen der Anzeige, zur Warnmeldung und zur Bedeutung von Veränderungen in der Anzeige gestellt (s. Anhang C). Dazu wurden Standbilder und kurze Videos der Anzeige vorgeführt. Zwei Versuchsleiter kodierten die freien Antworten anhand einer Übersicht richtiger Antworten, indem sie diese den Kategorien „richtig“, „teilweise richtig“, „falsch“ und „keine Angabe“ zuordneten. In sechs Fällen einer Abweichung der Versuchsleiterurteile wurden die Zuordnungen gemeinsam entschieden. Neben diesen objektiven Daten wurde die subjektive Bewertung der Verständlichkeit der Anzeigen über eine Frage erfasst (s. Anhang C).

**Tabelle 10-1: Skalen des Akzeptanzfragebogens**

Skala	Beschreibung	Interne Konsistenz	Retest Reliabilität
<b>Akzeptanz</b>	Kauf- und Nutzungsabsichten der Anzeige (z.B. „Ich würde die Anzeige gern in meinem Auto besitzen.“)	.84	.87
<b>Einstellung</b>	Positive Einstellung gegenüber der Anzeige (z.B. „Mit dieser Anzeige würde ich mich wohl fühlen.“)	.93	.95
<b>Ablehnung</b>	Negative Einstellung und Bedenken gegenüber der Anzeige (z.B. „Ich werde anderen Menschen vom Kauf dieser Anzeige abraten.“)	.47	.79
<b>Soziale Norm</b>	Was denken andere über die Anzeige? (z.B. „Mit dieser Anzeige könnte ich mich bei meinen Freunden sehen lassen.“)	.85	.83
<b>Interesse</b>	Globales Interesse an mehr Informationen über die Anzeige (z.B. „Ich möchte das System mit dieser Anzeige gern intensiver ausprobieren.“)	.77	.78

Anmerkung: Die Angaben zur internen Konsistenz stammen aus einer Untersuchung der Fragebogenendform mit einem innovativen System für Fahrzeuge an 117 Probanden. Die Retest-Reliabilität wurde mit dem gleichen System an 33 Probanden ermittelt.

Weiterhin wurde erwartet, dass die 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten eine höhere Akzeptanz erzielt, weil sie als ästhetischer/attraktiver, nützlicher und qualitativ hochwertiger eingeschätzt wird als die konventionelle 2D-Anzeige. Die Akzeptanz wurde anhand eines Fragebogens untersucht, der im Rahmen einer Diplomarbeit in der Forschungsabteilung „Akzeptanz- und Verhaltensanalyse“ der Daimler AG in Zusammenarbeit mit dem Institut für Psychologie der Humboldt-Universität zu Berlin entwickelt wurde (Meyer, 2002). Der Akzeptanzfragebogen hat seine theoretischen Grundlagen im dynamischen Akzeptanzmodell von Kollmann (1998) und in der Theorie des geplanten Verhaltens von Ajzen (1985) und wurde speziell für die Erfassung der Akzeptanz von neuartigen Fahrzeugsystemen entwickelt. Der Fragebogen

enthält 25 Fragen, welche den Skalen *Akzeptanz*, *Einstellung*, *Ablehnung*, *soziale Norm* und *Interesse* zugeordnet sind (s. Tab. 10-1; Anhang C, Fragebogenteil D). Die Fragebogenendform wird den Anforderungen an die Testgütekriterien Reliabilität, Validität und Objektivität gerecht (s. Tab. 10-1). Die Itemselektion erfolgte in vier Untersuchungen mit drei verschiedenen Systemen und insgesamt 210 Probanden. Der Akzeptanzfragebogen ist seit 2002 bei der Bewertung innovativer Systeme der Daimler AG im Einsatz.

Des Weiteren wurde für die 2D- und 3D-Anzeigen des ART ein Fragebogen zu den Akzeptanzursachen<sup>4</sup> erstellt. Dieser sollte Aufschluss darüber geben, worin die Probanden die Vor- und Nachteile der 2D- und 3D-Anzeigen sahen. Er enthielt 15 Fragen zur *Ästhetik/ Attraktivität*, 22 Fragen zur *Funktionalität* und 5 Fragen zur *Qualität* der Anzeigen (s. Anhang C, Fragebogenteile A bis C). Darüber hinaus wurde jeweils eine Frage zum Gesamturteil der *Ästhetik/ Attraktivität*, der *Funktionalität* und der *Qualität* der Anzeigen gestellt.

Da aufgrund der Literaturanalyse und der Ergebnisse in Experiment 2 noch keine Entscheidung darüber gefällt werden konnte, welcher Höhenwinkel für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen am besten geeignet ist, sobald die Aufgabe einen Abgleich zwischen Anzeige und Umgebung erfordert, wurden in Experiment 3 drei verschiedene Höhenwinkel einer subjektiven Bewertung der Probanden unterzogen (s. Abb. 10-2). Die beiden Höhenwinkel 22.5° und 45° stellen die Grenzen des Bereiches von Höhenwinkeln dar, welcher bei Aufgaben mit Abgleich zwischen Anzeige und Außensicht einen sinnvollen Kompromiss zwischen der Auflösung in der Tiefe und der räumlichen Kompatibilität verspricht (s. Abschn. 5.6). Da bei der Nutzung des Abstandsregeltempomaten die genaue Schätzung des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug trotz Anzeige anhand der realen Sicht aus dem Fahrzeug erfolgt, sind mit Hilfe der Anzeigen nur grobe Tiefenurteile erforderlich. Grobe Tiefenurteile senken die Ansprüche an die Auflösung in der Tiefe, solange diese einen minimalen Wert nicht unterschreitet, wie es für die exakte Fahrerperspektive der Fall ist (Green & Williams, 1992; Heller et al., 2003). Ein nahezu egozentrischer Höhenwinkel von 15° wurde dennoch eingesetzt, um einen extremen Pol flacher Höhenwinkel bei der Ausführung von Aufgaben mit erforderlichlichem Abgleich zu markieren.

Die ursprüngliche Erwartung, dass eine egozentrische Fahrerperspektive einen Attraktivitätsvorteil bringt, wurde in Laborexperiment 2 mit einem Höhenwinkel von 13° widerlegt. In Feldexperiment 3 wurde dieses Ergebnis unter

---

<sup>4</sup> Der Fragebogen zu den Akzeptanzursachen wurde von Dr. Kai Geertsema aus der Abteilung „Akzeptanz- und Verhaltensanalyse“ und der Verfasserin dieser Arbeit im Rahmen des Forschungsprojekts „ARTIST“ der Daimler AG gemeinsam entwickelt.

realitätsnahen Anwendungsbedingungen und mit dem etwas größeren Höhenwinkel von  $15^\circ$  nochmals überprüft. Auflösungs Nachteile in der Tiefe können bei flachen Höhenwinkeln zudem durch visuelle Hilfsmittel wie die verwendeten Distanzsegmente reduziert werden (s. Experiment 2). Aus Aufwandsgründen wurden die Versuchsfahrten nur mit den Höhenwinkeln  $15^\circ$  und  $22.5^\circ$  durchgeführt. Um von jedem Probanden trotzdem eine vergleichende Bewertung der drei Höhenwinkel  $15^\circ$ ,  $22.5^\circ$  und  $45^\circ$  erfragen zu können, wurde jede dieser Perspektiven am Ende des Experiments jeweils fünf Minuten während der Fahrt erprobt. Danach wurden vier Fragen zur subjektiven Bewertung der Attraktivität und der Nützlichkeit der drei Höhenwinkel gestellt und in Form von Rangreihen beantwortet (s. Anhang C).



$15^\circ$  Höhenwinkel



$22.5^\circ$  Höhenwinkel



$45^\circ$  Höhenwinkel

### Abbildung 10-2: Höhenwinkel der 3D-Anzeigen für Experiment 3

Ein Vorversuch mit 12 Probanden ergab, dass sogar leichte Abweichungen des Azimuts von der Blickrichtung des Fahrers als derartig störend beim Abgleich der Fahrzeugumgebung mit der Anzeige des Abstandsregeltempomaten empfunden wurden, dass alle 12 Probanden die 3D-Anzeigen ohne Azimutrotation klar bevorzugten. Deshalb wurde auf die in Experiment 2 beschriebenen Vorteile einer Azimutrotation bei flachen Höhenwinkeln verzichtet und alle Perspektiven mit  $0^\circ$  Azimutwinkel umgesetzt.

Zusammenfassend wurden in Experiment 3 die Faktoren *Anzeige* (within-Faktor in Versuchsteil 1 und 2: 2D, 3D) und für die 3D-Anzeige der Faktor *Höhenwinkel* (between-Faktor in Versuchsteil 1 und 2: 15°, 22.5°; within-Faktor in Versuchsteil 3: 15°, 22.5°, 45°) untersucht. Als Versuchsreize wurden Anzeigen des Abstandsregeltempomaten verwendet. Das unmittelbare Verständnis wurde mit Hilfe eines Tests mit 14 offenen Fragen sowie einer Frage zur subjektiven Bewertung der Verständlichkeit erfasst. Die abhängigen Variablen waren dabei die Anzahl richtiger und teilweise richtiger Antworten und der Skalenwert der subjektiven Verständlichkeit. Die Akzeptanz wurde über einen Fragenbogen zu den Akzeptanzursachen mit drei Skalen, über den eigentlichen Akzeptanzfragebogen mit fünf Skalen sowie über vier Fragen zur Bewertung der Attraktivität und der Nützlichkeit der Höhenwinkel erfasst. Die abhängigen Variablen waren dabei die Skalenwerte in den Fragebögen und die Rangreihen in der Bewertung der Höhenwinkel.

Im Einzelnen wurden folgende Hypothesen überprüft:

- **Hypothese 1:** Die 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten ist unmittelbarer verständlich als die konventionelle 2D-Anzeige. Dementsprechend wird die 3D-Anzeige auch subjektiv als verständlicher bewertet als die 2D-Anzeige.
- **Hypothese 2:** Die 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten erzielt eine bessere subjektive Bewertung im Fragebogen zu den Akzeptanzursachen (*Ästhetik/Attraktivität, Funktionalität, Qualität*) und demzufolge auch im Akzeptanzfragebogen (*Akzeptanz, Einstellung, Ablehnung, soziale Norm, Interesse*) als die konventionelle 2D-Anzeige.

Da es bisher keine Erkenntnisse zur subjektiven Bewertung unterschiedlicher Höhenwinkel einer 3D-Anzeige (15°, 22.5° oder 45°) bei erforderlichem Abgleich zwischen Anzeige und Außensicht während der Fahrt gibt, wurde hierzu keine Hypothese aufgestellt.

## 10.2 Methode

### 10.2.1 Versuchsplan

Im ersten Versuchsteil zur Erfassung des unmittelbaren Verständnisses und im zweiten Versuchsteil zur Erfassung der Akzeptanz wurde ein unvollständiger zweifaktorieller Versuchsplan angewendet (s. Tab. 10-2). Der *within*-Faktor *Anzeige* wurde hier zweistufig realisiert (2D, 3D). Der Faktor *Höhenwinkel* war als *between*-Faktor für die 3D-Anzeige zweifach gestuft (15°, 22.5°). Im dritten Versuchsteil zur subjektiven Bewertung der Höhenwinkel wurde der Faktor *Höhenwinkel* als *within*-Faktor dreifach gestuft (15°, 22.5°, 45°). Die

Reihenfolge der Darbietung der Faktoren *Anzeige* und *Höhenwinkel* wurde vollständig permutiert. Als abhängige Variablen wurden die Anzahl der richtigen und teilweise richtigen Antworten im Test zum unmittelbaren Verständnis, die Skalenwerte in der Befragung der subjektiven Verständlichkeit, der Akzeptanzursachen, der Akzeptanz sowie die Rangreihen der Bewertung der drei Höhenwinkel ausgewertet.

**Tabelle 10-2: Versuchsplan für Experiment 3**

Anzeige (within)	2D-Seitenansicht	3D-Anzeige		
Höhenwinkel (between bzw. within)		15°	22.5°	45°
<b>1. Versuchsteil – Vor der Fahrt (Unmittelbares Verständnis 2D vs. 3D)</b>	N1, N2	N1	N2	-
<b>2. Versuchsteil – Zwei Versuchsfahrten je 15 min (Akzeptanz 2D vs. 3D und 15° vs. 22.5°)</b>	N1, N2	N1	N2	-
<b>3. Versuchsteil – Drei Versuchsfahrten je 5 min (Attraktivität und Nützlichkeit der drei Höhenwinkel)</b>	-	N1, N2	N1, N2	N1, N2

Anmerkungen: N<sub>1</sub> und N<sub>2</sub> sind unterschiedliche Stichproben.

### 10.2.2 Versuchsteilnehmer

An der Untersuchung nahmen 30 Versuchspersonen (3 Frauen, 27 Männer) mit einem durchschnittlichen Alter von 53 Jahren teil ( $SD = 11.25$ , 30 bis 70 Jahre). Alle Versuchsteilnehmer waren Mercedes-Kunden. Sie vertraten ein breites Spektrum an Berufsgruppen und Bildungsabschlüssen, wurden über eine Anzeige in der Stuttgarter Zeitung bzw. eine Versuchspersonendatenbank akquiriert und erhielten eine Aufwandsentschädigung von 60 EUR. Mit einem Sehtest (s. Experiment 1) wurde sichergestellt, dass keine der Versuchspersonen mit weniger als 0.7 Visus Nah- oder Fernsehschärfe (mit Sehhilfe, falls getragen) an der Untersuchung teilnahm. Technische Anwendungen (Word, E-Mail, Internet, SMS, PDA) wurden von fast allen Probanden regelmäßig genutzt, hingegen 3D-Anwendungen (Spiele, Simulationen, AR/VR-Anwendungen, CAD, 3D-Modellierungstools) selten bis gar nicht. Vier Versuchsteilnehmer hatten bereits Erfahrungen mit dem Abstandsregeltempomaten gesammelt, zwei von ihnen im eigenen Fahrzeug. Über Tempomaterfahrten verfügten 29 Probanden. Alle Versuchsteilnehmer waren erfahrene Autofahrer (> 10.000 km Jahresfahrleistung, > 5 Jahre Fahrerfahrung). Zwischen den beiden Versuchsgruppen gab es keine statistischen Unterschiede in den demographischen Variablen.

### 10.2.3 Apparatur

Das Feldexperiment fand im August 2004 in Stuttgart auf der B10 zwischen den Ausfahrten Stuttgart-Untertürkheim und Ebersbach statt. Die Versuchsfahr-



ten wurden mit einer Mercedes-Benz E-Klasse (W211, Baujahr 2003) zwischen 10.00 Uhr und 15.00 Uhr im normalen Straßenverkehr durchgeführt. Das Kombiinstrument des Versuchsfahrzeugs war mit einem TFT LC-Display ausgestattet, auf welchem die Anzeigen dargeboten wurden (Fa. Toshiba, Typ LTM10C353S, aktive Fläche 23.0 cm x 10.8 cm = 10 Zoll, Format 2:1, Bildwiederholrate 60 Hz, 1280 x 600 Pixel, Pixelgröße 0.18 mm, maximale Helligkeit 1150 cd/m<sup>2</sup>, Farbtiefe 3 x 6 bit RGB). Der Abstand zwischen Fahrer und Display variierte zwischen 70 cm und 90 cm. Zur Ansteuerung der Anzeigen und zur Aufzeichnung der Daten über die Nutzung des Abstandsregeltempomaten wurde je ein PC verwendet.



**Abbildung 10-3: Versuchsaufbau mit 3D-Anzeige für Experiment 3**

#### ***10.2.4 Versuchsreize***

Als Versuchsmaterial wurde eine 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten verwendet (s. Kap. 9). Die visuelle Komplexität wurde durch folgende Details im Vergleich zu Experiment 2 erhöht: Zweispurige Straße, Textur auf der Straße, Schatten unter den Fahrzeugen und den Distanzsegmenten. Die 2D-Anzeige, die in Fahrzeugen der Mercedes-Benz E-Klasse (W211) verbaut ist, wurde exakt nachgebildet. Inhaltliche Unterschiede zwischen den 2D- und 3D-Anzeigen bestanden darin, dass es in der 2D-Anzeige eine Distanzskala in Metern gab und in der 3D-Anzeige der zulässige Geschwindigkeitsbereich angezeigt wurde (s. Abb. 10-1). Graphisch unterschieden sich die Anzeigen nicht nur in der Dimensionalität (2D vs. 3D), sondern auch in spezifischen Details (s. Anhang C, Tab. C-1).

Die virtuelle Kamera war bei maximaler Distanz auf die Mitte zwischen den Fahrzeugen gerichtet. Im Unterschied zu Experiment 2 wurde die Distanz zwischen den Fahrzeugen vergrößert, 20 anstelle von 6 Distanzsegmenten dargestellt und größere Kameraöffnungswinkel als der Blickwinkel des



Betrachters zum Display verwendet (s. Kap. 9). Die geometrischen Parameter der 3D-Anzeige sind in Anhang C in Tabelle C-2 zu finden.

### ***10.2.5 Durchführung und Versuchsaufgaben***

Das Experiment dauerte mit jedem Probanden ca. zwei Stunden. Zunächst wurde der Ablauf erläutert. Danach füllten die Probanden einen demographischen Fragebogen aus und führten einen Sehtest durch. Ohne zuvor Informationen über den Abstandsregeltempomaten erhalten zu haben, wurden die Probanden im ersten Versuchsteil außerhalb des Fahrzeugs zum unmittelbaren Verständnis der ersten Anzeige befragt. Die Probanden erhielten keine Rückmeldung darüber, ob ihre Antworten richtig oder falsch waren. Danach begann der zweite Versuchsteil mit der Versuchsfahrt. In den ersten fünf Minuten gab die Versuchsleiterin den Probanden Aufgaben zur Übung der Bedienung des Systems vor. Notwendige Hilfestellungen zur richtigen Bedienung wurden protokolliert. Es gab keine über die Bedienung hinaus gehenden Instruktionen zur Funktionsweise des Systems. In den nächsten 15 Minuten fuhren die Probanden selbstständig mit dem System. Sie wurden anhand eines Szenarios instruiert, den Abstandsregeltempomaten immer einzusetzen, wenn die Verkehrslage es erlaubte, sowie die verschiedenen Funktionen und Einstellmöglichkeiten des Systems auszuprobieren. Während der freien Fahrt wurde ein Logfile über die Nutzung des Systems aufgezeichnet. Nach der Fahrt gaben die Probanden freie Kommentare zur Anzeige ab. Mit der zweiten Anzeige wurde der gleiche Ablauf ohne die Abfrage des unmittelbaren Verständnisses wiederholt. Nachdem die Probanden die 2D- und 3D-Anzeige während der Fahrt kennengelernt hatten, füllten sie den Fragebogen zu den Akzeptanzursachen und den Akzeptanzfragebogen aus. Im dritten Versuchsteil fuhren die Probanden jeweils fünf Minuten mit drei Höhenwinkeln der 3D-Anzeige ( $15^\circ$ ,  $22.5^\circ$  und  $45^\circ$ ), bevor sie diese anhand von vier Fragen subjektiv bewerteten. Alle Fragebögen, Protokollbögen und die Instruktion für die Versuchsfahrt sind in Anhang C zu finden.

### **10.3 Ergebnisse**

Für alle abhängigen Variablen wurden die Hypothesen zum Vergleich der 2D- und 3D-Anzeige durch  $t$ -Tests für abhängige Stichproben und zum Vergleich der Höhenwinkel  $15^\circ$  und  $22.5^\circ$  durch  $t$ -Tests für unabhängige Stichproben gerechnet. Die Normalverteilungsannahme wurde nicht in allen abhängigen Variablen bestätigt. Da die entsprechenden parameterfreien Verfahren keine abweichenden Ergebnisse erbrachten, wurden immer die Ergebnisse der  $t$ -Tests berichtet. Die Häufigkeiten der Präferenz für einen der drei Höhenwinkel wurden mit dem  $\chi^2$ -Test ausgewertet. Die statistischen Kennwerte sind in Anhang C in den Tabellen C-4 bis C-6 aufgeführt.

Die Daten über die Nutzung des Abstandsregeltempomaten zeigten lediglich in der Häufigkeit der Veränderung der Wunschgeschwindigkeit und des Wunschabstandes signifikante Unterschiede zwischen der 2D- und 3D-Anzeige (s. Anhang C, Tab. C-3). In der Übungsphase der Versuchsfahrt wurden jedem Probanden mit jeder Anzeige weniger als 0.5 Hilfen zur Bedienung gegeben. Hier gab es keine Unterschiede zwischen den Anzeigen.

### 10.3.1 Unmittelbares Verständnis

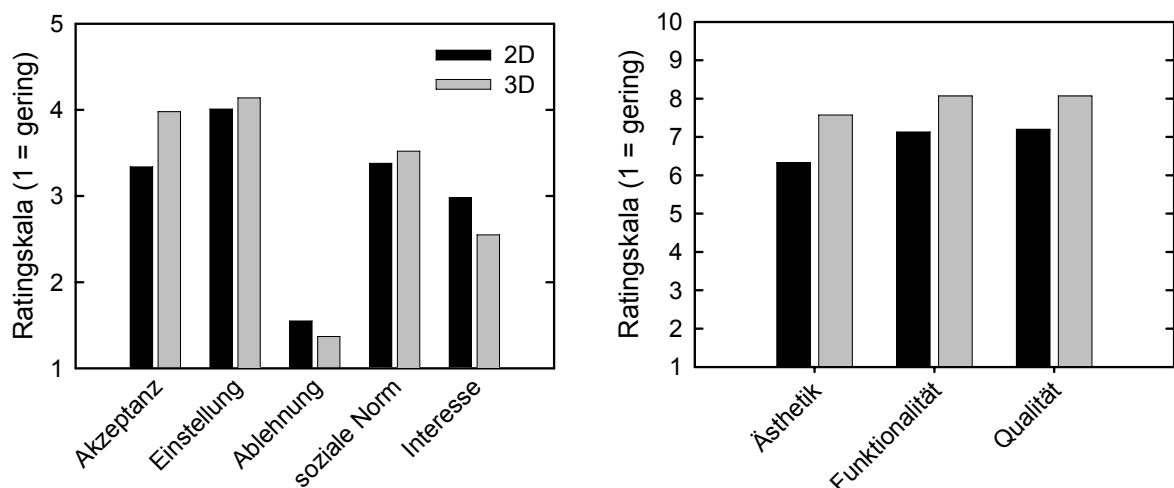
Vier Probanden wurden aus der Auswertung des unmittelbaren Verständnisses ausgeschlossen, da sie bereits über Erfahrungen mit dem Abstandsregeltempomaten verfügten. Bei der 3D-Anzeige ( $M = 10.0$ ) wurden signifikant mehr Fragen zum unmittelbaren Verständnis richtig bzw. teilweise richtig beantwortet als bei der 2D-Anzeige ( $M = 8.0$ ),  $t(25) = 2.18, p < .05$ . Die Ergebnisse der 3D-Anzeige waren nicht abhängig von der Technikerfahrung. Bei der 2D-Anzeige beantworteten die Probanden mit wenig Technikerfahrung ( $M = 7.9$ ) weniger Fragen richtig bzw. teilweise richtig als die Probanden mit viel Technikerfahrung ( $M = 10.2$ ),  $t(25) = 2.28, p < .05$ . In Übereinstimmung mit den objektiven Daten wurde die Verständlichkeit der 3D-Anzeige ( $M = 2.77$ ) auf einer fünfstufigen Skala (1 = verständlich bis 5 = verwirrend) signifikant höher eingeschätzt als die der 2D-Anzeige ( $M = 2.20$ ),  $t(29) = 2.25, p < .05$ . Erwartungsgemäß war die 3D-Anzeige insgesamt besser verständlich als die konventionelle 2D-Anzeige.

### 10.3.2 Akzeptanz

Die Ergebnisse zur Akzeptanz sind in Abbildung 10-4 dargestellt. Die *Akzeptanz* war auf einer fünfstufigen Skala (1 = Merkmal gering ausgeprägt bis 5 = Merkmal stark ausgeprägt) für die 3D-Anzeige ( $M = 3.98$ ) signifikant höher als für die 2D-Anzeige ( $M = 3.34$ ),  $t(29) = 3.86, p < .01$ . Für die 3D-Anzeige lag die Akzeptanz damit auf dem Niveau etablierter Fahrerassistenzsysteme. In den Skalen *Einstellung*, *Ablehnung* und *soziale Norm* wurde die 3D-Anzeige lediglich geringfügig, aber nicht signifikant, besser bewertet als die 2D-Anzeige. Im Gegensatz zu den bisher berichteten Ergebnissen gaben die Probanden an, signifikant mehr *Interesse* an weiteren Informationen zur 2D- ( $M = 2.98$ ) als zur 3D-Anzeige ( $M = 2.55$ ) zu haben,  $t(29) = -3.01, p < .05$ ; wobei die Skalenwerte für beide Anzeigen sehr gering waren.

Die höhere Akzeptanz der 3D-Anzeige ließ sich durch die Ergebnisse im Fragebogen zu den Akzeptanzursachen begründen. Die *Funktionalität* der 3D-Anzeige wurde im Gesamturteil signifikant,  $t(29) = 2.10, p < .05$ ; die *Qualität* tendenziell,  $t(29) = 1.88, p < .1$ ; und die *Ästhetik/ Attraktivität* ebenfalls tendenziell,  $t(29) = 1.97, p < .1$ ; besser bewertet als die der 2D-Anzeige (s. Abb. 10-4). In den Einzelfragen zur *Funktionalität* der

3D-Anzeige waren einzelne Elemente deutlicher erkennbar, die Anzeige war übersichtlicher, die Perspektive sinnvoller, die Informationen der Anzeige waren leichter auf die Fahrsituation übertragbar, es war klarer, wann der Fahrer selbst bremsen muss, Gefahrensituationen waren eindeutiger erkennbar und die Anzeige war insgesamt nützlicher für das System. Die genannten Unterschiede waren mindestens auf dem 5%-Niveau signifikant. Keine der beiden Anzeigen wurde als ablenkend eingeschätzt. Es zeigten sich keine Vorteile der 3D-Anzeige in der Bewertung der Verständlichkeit und Erlernbarkeit der Funktionsweise des Systems sowie in der Erkennbarkeit der getätigten Einstellungen. Bezüglich der *Qualität* wurde die 3D-Anzeige als signifikant moderner und eher auf dem neuesten Stand der Technik befindlich eingeschätzt als die 2D-Anzeige. Weitere signifikante Vorteile für die 3D-Anzeige ergaben sich in der subjektiven Bewertung der *Ästhetik/ Attraktivität* bezüglich Detaillierungsgrad, Formen, Farben, Perspektive und Art der Darstellung. Die 2D-Anzeige wurde in keiner der restlichen Fragen attraktiver als die 3D-Anzeige gefunden.



#### Abbildung 10-4: Ergebnisse Akzeptanz 2D vs. 3D für Experiment 3

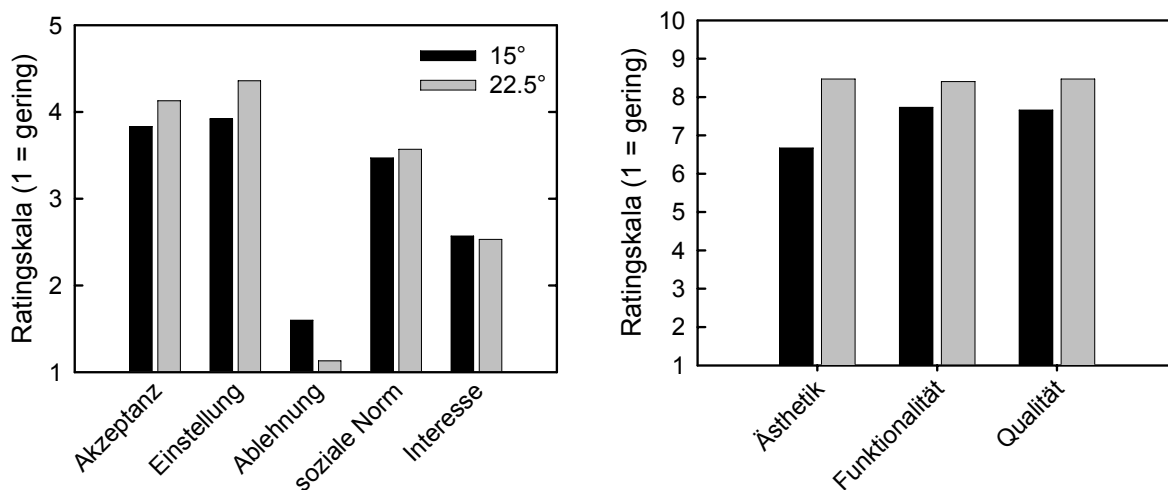
Links sind die Ergebnisse der Bewertung der Anzeigen des Abstandsregeltempomaten im Akzeptanzfragebogen und rechts im Fragebogen zu den Akzeptanzursachen abgebildet, jeweils in Abhängigkeit von der Darstellung in 2D und 3D. ( $N = 30$ ).

Es wurden für die 3D-Anzeige (1.8/Proband) fast doppelt so viele positive Kommentare abgegeben als für die 2D-Anzeige (1.0/Proband), wohingegen die Anzahl der negativen Kommentare für beide Anzeigen vergleichbar war (1.2/Proband).

Insgesamt war die Akzeptanz der 3D-Anzeige aufgrund der größeren *Ästhetik/ Attraktivität*, *Funktionalität* und *Qualität* erwartungsgemäß höher als die der 2D-Anzeige.

### 10.3.3 Höhenwinkel

Die Auswertung der Akzeptanz wurde außerdem für den Vergleich der Höhenwinkel 15° und 22.5° der 3D-Anzeige durchgeführt. Abbildung 10-5 zeigt Vorteile für den Höhenwinkel 22.5° in den Skalen *Akzeptanz*, *Einstellung* und *Ablehnung*. Die Höhenwinkel unterschieden sich jedoch nur in der *Einstellung* signifikant,  $t(28) = 2.29, p < .05$ ; und in der *Ablehnung* tendenziell,  $t(28) = 1.88, p < .1$ . In den Akzeptanzursachen gab es lediglich im Gesamturteil zur *Ästhetik/ Attraktivität* einen signifikanten Vorteil für den Höhenwinkel 22.5°,  $t(28) = 3.28, p < .01$ . Die Ergebnisse zur *Funktionalität* und zur *Qualität* zeigten zwar in die gleiche Richtung, erreichten aber keine Signifikanz. In den Einzelfragen war der Höhenwinkel 22.5° insgesamt die attraktivere und sinnvollere Perspektive und wurde in keiner Frage schlechter als der Höhenwinkel 15° bewertet. Hervorzuheben ist, dass der Höhenwinkel 22.5° als weniger ablenkend empfunden wurde, höchstwahrscheinlich weil sich hier die Größen der Objekte in Abhängigkeit vom Abstand weniger veränderten.



**Abbildung 10-5: Ergebnisse Akzeptanz Höhenwinkel 15° vs. 22.5° für Experiment 3**

Links sind die Ergebnisse der Bewertung der 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten im Akzeptanzfragebogen und rechts im Fragebogen zu den Akzeptanzursachen abgebildet, jeweils in Abhängigkeit der Höhenwinkel 15° und 22.5°. ( $N = 30$ ).

Im dritten Versuchsteil führen die Probanden jeweils fünf Minuten mit den 3D-Anzeigen der Höhenwinkel 15°, 22.5° und 45°. Der Höhenwinkel 22.5° wurde mit 17 Nennungen insgesamt für eine Verwendung im Fahrzeug signifikant bevorzugt, gefolgt von 7 Nennungen für den Höhenwinkel 15° und 5 Nennungen für den Höhenwinkel 45°,  $\chi^2(3, N=30) = 18.53, p < .001$ . Der Höhenwinkel 22.5° war außerdem mit 16 Nennungen die attraktivste Perspektive,  $\chi^2(2, N=30) = 6.20, p < .05$ . Die Distanzschätzung fiel mit den Höhenwinkeln 22.5° und 45° gleichermaßen leicht. Der Abgleich war mit den Höhenwinkeln 22.5° und 15° gleichermaßen einfach.

Insgesamt stellte der Höhenwinkel  $22.5^\circ$  im subjektiven Urteil der Probanden den besten Kompromiss zwischen Abgleich und Auflösung in der Tiefe dar und wurde zudem als am attraktivsten und am wenigsten ablenkend bewertet.

## 10.4 Diskussion

Es wurde in einem Feldexperiment im Straßenverkehr mit Mercedes-Kunden überprüft, ob eine monoskopische 3D-Anzeige im Vergleich zu einer derzeit in Serienfahrzeugen verwendeten 2D-Anzeige das unmittelbare Verständnis und die Akzeptanz der Anzeige des Abstandsregeltempomaten steigert. Zudem wurde ermittelt, welcher Höhenwinkel der 3D-Anzeige ( $15^\circ$ ,  $22.5^\circ$  und  $45^\circ$ ) nach Meinung der Kunden am besten geeignet ist.

Mit der 3D-Anzeige wurden entsprechend der Annahmen in Hypothese 1 signifikant mehr Fragen zum unmittelbaren Verständnis richtig bzw. teilweise richtig beantwortet als mit der konventionellen 2D-Anzeige. Mit diesem Ergebnis stimmte auch die subjektive Einschätzung der Versuchsteilnehmer zur Verständlichkeit der Anzeigen überein. Das bessere unmittelbare Verständnis der 3D-Anzeige wurde außerdem dadurch unterstrichen, dass diese im Gegensatz zur 2D-Anzeige unabhängig von der Technikerfahrung der Probanden war. Da es sich in Experiment 3 um einen Prototypenvergleich handelte, können keine endgültigen Aussagen darüber getroffen werden, welcher Teil der Variation der Bildhaftigkeit den Vorteil der 3D-Anzeige verursachte. War es die Wahl der Objekte und deren Anordnung (3D: Fahrzeuge, Straße, Sensorkegel vs. 2D: Fahrzeugsymbol, Linien), die perspektivische Darstellung (3D-Perspektive vs. 2D-Seitenansicht) oder der Grad an Realismus (3D: detailliertes Fahrzeugmodell, Helligkeitsverläufe, Texturen, Schatten)? Diesen Fragen muss in weiterführenden Untersuchungen nachgegangen werden.

Wie in Hypothese 2 erwartet, war die Akzeptanz für die 3D-Anzeige insgesamt höher als für die 2D-Anzeige. Auch wenn die 3D-Anzeige im Akzeptanzfragebogen (*Akzeptanz, Einstellung, Ablehnung, soziale Norm, Interesse*) nur in der Skala *Akzeptanz* signifikant besser bewertet wurde und in der Skala *Interesse* sogar signifikant schlechter als die 2D-Anzeige, so zeigten alle weiteren Ergebnisse in die Richtung eines Akzeptanzvorteils der 3D-Anzeige. Im Fragebogen zu den Akzeptanzursachen (*Ästhetik/ Attraktivität, Funktionalität, Qualität*) überwogen die positiven Bewertungen für die 3D-Anzeige ebenso wie in den freien Kommentaren. Das Interesse an weiteren Informationen war generell für beide Anzeigen sehr gering. Dies war vermutlich deswegen so, weil die Anzeigen bereits während des Versuches ausreichend erprobt wurden. Eventuell war das Interesse an der 2D-Anzeige höher, weil mit dieser

insgesamt weniger gefahren wurde (nur in Versuchsteil 2) als mit der 3D-Anzeige (in Versuchsteil 2 und 3) und weil die Probanden wussten, dass das System in aktuellen Fahrzeugen der E- und S-Klasse mit der 2D-Anzeige erhältlich ist.

Der Höhenwinkel  $22.5^\circ$  war im subjektiven Urteil der Probanden am besten für die 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten geeignet. Im Akzeptanzfragebogen und im Fragebogen zu den Akzeptanzursachen bewerteten die Probanden, die in der Versuchsfahrt mit dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$  gefahren waren, die 3D-Anzeige besser als jene, die den Höhenwinkel  $15^\circ$  erlebten. Nachdem die Mercedes-Kunden im dritten Versuchsteil jeweils fünf Minuten mit einem der Höhenwinkel  $15^\circ$ ,  $22.5^\circ$  und  $45^\circ$  gefahren waren, bevorzugten sie ebenfalls den Höhenwinkel  $22.5^\circ$ . Dieser war im Probandenurteil gleichermaßen gut für den Abgleich mit der Außensicht wie für die Distanzschätzung entlang der Sichtlinie geeignet und wurde zudem als besonders attraktiv sowie als weniger ablenkend bewertet. Es sei darauf hingewiesen, dass der direkte Vergleich der drei Höhenwinkel auf unterschiedlichen Erfahrungen beruhte. Der Höhenwinkel  $45^\circ$  wurde nie länger als fünf Minuten erprobt, während mit einem der Höhenwinkel  $15^\circ$  bzw.  $22.5^\circ$  bereits im zweiten Versuchsteil gefahren wurde. Wie bereits in Experiment 2 konnte auch hier nicht bestätigt werden, dass die egozentrische Fahrerperspektive als besonders attraktiv bewertet wurde.

**Zusammenfassend** zeigten sich in Experiment 3 - wie ursprünglich angenommen - für die 3D-Anzeige ein besseres unmittelbares Verständnis aufgrund deren größerer Bildhaftigkeit und eine höhere Akzeptanz aufgrund deren größerer Attraktivität.

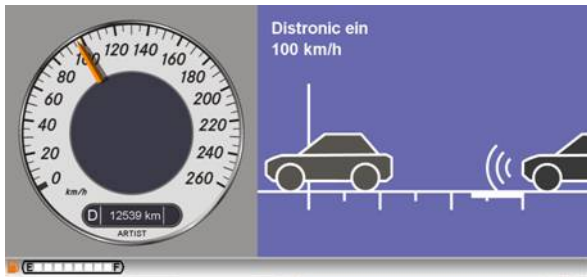
## 11 Experiment 4 – Vergleich von 2D- und 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten im Fahrsimulator

### 11.1 Fragestellung und Hypothesen

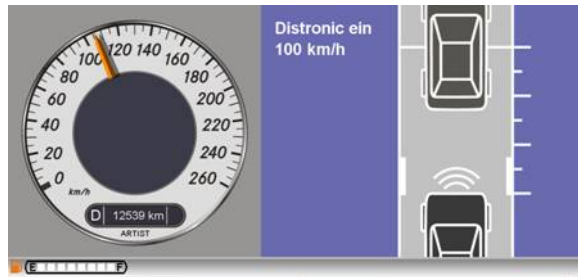
In Experiment 4 wurde unter kontrollierten Bedingungen im Fahrsimulator untersucht, ob sich weitere der erwarteten Vorteile von 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten gegenüber 2D-Anzeigen zeigen. Die besonderen Vorteile von 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten wurden in der räumlichen Kompatibilität, der Aufmerksamkeitslenkung, der Bildhaftigkeit und der Attraktivität gesehen (s. Abschn. 4.4). In Experiment 3 wurden bereits ein besseres unmittelbares Verständnis (Vorteil Bildhaftigkeit) und eine höhere Akzeptanz (Vorteil Attraktivität) einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten nachgewiesen. In Experiment 4 lag der Fokus auf einer Überprüfung des 3D-Vorteils der räumlichen Kompatibilität am Beispiel der Anzeige eines Fahrerassistenzsystems. Wegen der größeren räumlichen Kompatibilität von 3D-Anzeigen dürfte sich der Abgleich von Anzeige und Umgebung vereinfachen und sich damit die Wahrnehmungssicherheit erhöhen. Da bei flachen Höhenwinkeln die Auflösung in der Tiefe sinkt und Tiefenurteile demzufolge schwerer fallen (s. Experiment 2), musste ein Kompromiss zwischen der Auflösung der Informationen in der Tiefe und dem Abgleich einer Anzeige mit der Umgebung gefunden werden. Ferner sollte der im Feldexperiment 3 gefundene Akzeptanzvorteil von 3D-Anzeigen im Simulatorexperiment 4 mit inhaltlich und graphisch vergleichbaren Anzeigen unter kontrollierten Bedingungen repliziert werden. Da vorstellbar war, dass die besondere Attraktivität bildhafter 3D-Anzeigen dazu führt, dass die Fahrer häufiger und länger auf das Kombiinstrument im Fahrzeug schauen und dadurch die primäre Fahraufgabe vernachlässigen, wurde außerdem untersucht, ob die Verwendung von 3D-Anzeigen während der Fahrt zu einer stärkeren Ablenkungswirkung führt als vergleichbare 2D-Anzeigen. Eine höhere visuelle Komplexität der 3D-Anzeigen kann die Informationsaufnahme verzögern und zu einer stärkeren Ablenkungswirkung führen (s. Abschn. 3.1.5 und Kap. 9).

Zusammenfassend wurde der Einfluss der Faktoren *räumliche Kompatibilität* und *visuelle Komplexität* auf die Wahrnehmungssicherheit, die Ablenkungswirkung und die subjektive Bewertung der Nützlichkeit und der Attraktivität von inhaltlich und graphisch vergleichbaren Anzeigen des Abstandsregeltempomaten unter kontrollierten Bedingungen im Fahrsimulator untersucht. Die Ausprägungen der Dimensionalität (2D vs. 3D) ergaben sich aus der Variation des Faktors *räumliche Kompatibilität* (durch die Darstellung unterschiedlicher Perspektiven) sowie aus der Verwendung von mehr oder weniger monokularen Tiefenkriterien. Die beiden Faktoren *räumliche Kompatibilität* und *visuelle*

*Komplexität* wurden unvollständig kombiniert und in Form von fünf Anzeigen umgesetzt: 2D-Seitenansicht, 2D-Draufsicht, 3D-einfach-22.5° Höhenwinkel, 3D-komplex-22.5° Höhenwinkel und 3D-komplex-15° Höhenwinkel. Die fünf Anzeigen sind in Abbildung 11-1 dargestellt.



Anzeige 1: 2D-Seitenansicht



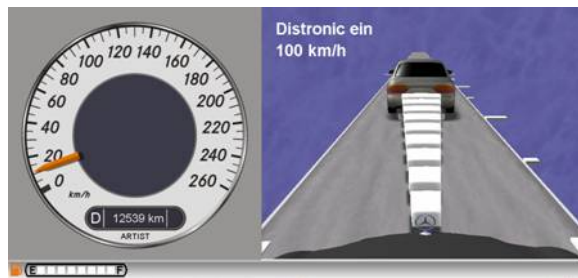
Anzeige 2: 2D-Draufsicht



Anzeige 3: 3D-einfach-22.5° Höhenwinkel



Anzeige 4: 3D-komplex-22.5° Höhenwinkel



Anzeige 5: 3D-komplex-15° Höhenwinkel

#### Abbildung 11-1: Anzeigen für Experiment 4

Die **räumliche Kompatibilität** wurde als wichtiger Vorteil von 3D-Anzeigen beschrieben, sobald die Aufgabe einen Abgleich zwischen Anzeige und Umgebung erfordert (s. Abschn. 3.1.3). Ein optimaler Abgleich mit der Fahrzeugumgebung wird durch 3D-Anzeigen in der Fahrerperspektive gewährleistet. Da der flache Höhenwinkel der Fahrerperspektive eine geringe Auflösung in der Tiefe und damit langsamere und ungenauere Tiefenurteile zur Folge hat als größere Höhenwinkel (s. Experiment 2), konkurrieren die Anforderungen einer optimalen Auflösung in der Tiefe und eines einfachen Abgleichs zwischen Anzeige und Umgebung. Einen sinnvollen Kompromiss zwischen der Auflösung in der Tiefe und dem Abgleich versprechen für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen Höhenwinkel zwischen 20° und 45° (s. Abschn. 5.6). Im subjektiven Urteil der Versuchsteilnehmer stellte der Höhenwinkel 22.5° den besten Kompromiss für eine 3D-Anzeige des



Abstandsregeltempomaten dar (s. Experiment 3). In Experiment 4 sollte dieser Kompromiss unter kontrollierten Bedingungen anhand von objektiven Daten untersucht werden. Es wurden dazu zwei Distanzschätzungsaufgaben (Aufgaben 1 und 2) und eine Aufgabe zur Objekterkennung (Aufgabe 3) eingesetzt, die einen Abgleich von Anzeige und Umgebung erforderten. Mit Hilfe der beiden Distanzschätzungsaufgaben wurden genaue Tiefenurteile erfasst, welche mit einer Anzeige des Abstandsregeltempomaten aber normalerweise nicht erforderlich sind. Dadurch, dass in Experiment 4 dennoch genaue Tiefenurteile erfasst wurden, konnten allgemeine Aussagen über die räumliche Tiefenwahrnehmung in 3D-Anzeigen mit unterschiedlichen Perspektiven abgeleitet werden. Außerdem dürften die Ergebnisse zum Kompromiss zwischen der Auflösung in der Tiefe und dem Abgleich dadurch generalisierbar auf andere 3D-Anzeigen in Fahrzeugen und in anderen Nutzungskontexten sein.

Über die Wahl der Perspektive wurden die räumliche Kompatibilität und die Auflösung in der Tiefe in den Anzeigen variiert (s. Tab. 11-1 in Abschn. 11.2.1). Die 2D-Anzeigen enthalten die Distanzinformation in maximaler Auflösung. Aufgrund der Azimutrotation von  $90^\circ$  hat die 2D-Seitenansicht die geringste räumliche Kompatibilität. Die 2D-Draufsicht ist in Fahrtrichtung angeordnet und entspricht dem Stereotyp, dass oben auf einem vertikalen Display befindliche Informationen als vorn in der Realität interpretiert werden (Franklin & Tversky, 1990; McCarley & He, 2001; Norman, 2002; Shepard & Hurwitz, 1984). Die 3D-Anzeigen mit dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$  entsprechen dem vermuteten Kompromiss zwischen Auflösung in der Tiefe und Abgleich, wenn - wie bei der Anzeige des Abstandsregeltempomaten - nur grobe Tiefenurteile erforderlich sind. Zusätzlich wird der Höhenwinkel  $15^\circ$  eingesetzt, der nur geringfügig höher als die Fahrerperspektive ist, um eine extreme Anzeige mit einer geringen Auflösung in der Tiefe und einer hohen räumlichen Kompatibilität zu realisieren.

Die Bildhaftigkeit von 3D-Anzeigen geht nicht notwendigerweise mit einer hohen **visuellen Komplexität** einher. Möglicherweise senkt eine größere Bildhaftigkeit sogar die visuelle Komplexität, weil einzelne graphische Elemente als einheitliche Objekte wahrgenommen und verarbeitet werden (vgl. Abschn. 3.1.5). Oft werden Bildhaftigkeit, 3D und visuelle Komplexität konfundiert verwendet, weil 3D-Anzeigen meist anhand von komplexen Objekten und Szenen gestaltet werden. McDougall et al. (1999, 2000) wiesen jedoch eindrucksvoll die Unabhängigkeit von Bildhaftigkeit und visueller Komplexität nach. Darüber hinaus zeigte Experiment 1, dass ein stabiler Tiefeneindruck selbst dann entsteht, wenn in einer 3D-Anzeige einfache Objekte und wenige, aber sinnvolle Tiefenkriterien eingesetzt werden.

Demnach kann die Forderung nach visuell einfachen und gleichzeitig bildhaften 3D-Anzeigen erfüllt werden. In Experiment 4 wurde im Detail überprüft, inwieweit sich visuell einfache 2D- und 3D-Anzeigen von visuell komplexen 3D-Anzeigen in ihrer Wahrnehmungssicherheit, Ablenkungswirkung und subjektiven Bewertung unterscheiden. Dazu wurde eine visuell einfache 3D-Anzeige realisiert, die nicht wesentlich komplexer als die 2D-Anzeigen war, da sie nur wenige Tiefenkriterien und ein einfaches Fahrzeugmodell enthielt. In der visuell komplexen 3D-Anzeige wurden graphische Details verwendet, von denen ein Nutzen für die Tiefenwahrnehmung erwartet wurde (s. Kap. 9).

Die **Dimensionalität** der Anzeigen ergab sich aus der Perspektive und der Art und Anzahl der verwendeten monokularen Tiefenkriterien. Die 2D-Seitenansicht reproduzierte die in Fahrzeugen von Mercedes-Benz serienmäßig verwendete Anzeige des Abstandsregeltempomaten. Die 2D-Draufsicht hätte streng genommen bereits als 3D-Anzeige aufgefasst werden können, da hier das Tiefenkriterium relative Höhe enthalten war und zudem das Dach des Fahrzeugs durch perspektivische Linien angedeutet wurde. Da der Fokus von Experiment 4 auf der Überprüfung des erwarteten 3D-Vorteils der räumlichen Kompatibilität lag, wurde hier als definierendes Merkmal von 3D-Anzeigen die perspektivische Darstellung festgelegt, d.h. ein Höhenwinkel größer  $0^\circ$  und kleiner  $90^\circ$ . Des Weiteren wurde erwartet, dass die visuell komplexe 3D-Anzeige einen intensiveren Tiefeneindruck als die visuell einfache hervorbringt, da erstere mehr monokulare Tiefenkriterien enthielt sowie mehr Objekte und Details, an denen monokulare Tiefenkriterien ihre Wirkung entfalten.

Die Anzeigen wurden während der Fahrt im Simulator anhand von **Aufgaben** untersucht, die bei der normalen Nutzung des Abstandsregeltempomaten erforderlich sind bzw. allgemeine Aussagen über die Tiefenwahrnehmung zulassen. Die Anzeige des Abstandsregeltempomaten unterstützt den Fahrer bei der Erfassung von Rückmeldungen zu den Einstellungen des Systems, der Entscheidung darüber, ob und wann ein Eingreifen des Fahrers notwendig ist, der Überwachung der Systemfunktionalität sowie der Berücksichtigung der Systemgrenzen (vgl. Rudin-Brown & Parker, 2004; Stanton & Young, 2005). Insgesamt sollte die Anzeige dadurch die *situation awareness* des Fahrers bei der Nutzung des Abstandsregeltempomaten erhöhen und vor allem in der Lernphase dazu beitragen, dass sich ein adäquates Verständnis der Funktionalität und der Grenzen des Systems aufbaut. Vor dem Hintergrund dieser Aufgaben, die bei der Nutzung des Abstandsregeltempomaten anfallen (vgl. auch Abschn. 4.4), wurden die Versuchsaufgaben 2 und 3 ausgewählt.

Nachfolgend wird ein Überblick über alle Versuchsaufgaben gegeben:

- **Aufgabe 1 zur Distanzschätzung zum vorausfahrenden Fahrzeug** war der Versuchsaufgabe in Experiment 2 entlehnt und sollte einen Vergleich der Ergebnisse der Experimente 2 und 4 sowie allgemeine Aussagen über die Güte der räumlichen Tiefenwahrnehmung in 3D-Anzeigen bei gleichzeitigem Abgleich ermöglichen. Auch wenn die absolute Distanzschätzung zum vorausfahrenden Fahrzeug normalerweise anhand der Außensicht erfolgt, sollte die Anzeige die realen Abstandsverhältnisse angemessen wiedergeben, sodass zumindest grobe Tiefenurteile gefällt werden können. Andere Anzeigen von Fahrerassistenz- bzw. Informationssystemen wie Nachtsichthilfe und Navigation erfordern genauere Tiefenurteile als die des Abstandsregeltempomaten.
- In **Aufgabe 2 zur Distanzschätzung des Wunschabstands** wurde der aktuelle Abstand des vorausfahrenden Fahrzeugs zum eingestellten Wunschabstand ins Verhältnis gesetzt und auf diese Weise beurteilt, ob der Wunschabstand unter- oder überschritten bzw. ob er genau eingehalten wurde. Diese Information ist für den Fahrer deshalb wichtig, weil er daran erkennen kann, ob das System das eigene Fahrzeug in einer konkreten Situation ausreichend abbremst oder beschleunigt (*check ACC braking*: Stanton & Young, 2005). Bei einem starken Unterschreiten des Wunschabstands kann sich der Fahrer darauf vorbereiten, demnächst wieder selbst bremsen zu müssen.
- **Aufgabe 3 zum Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs** greift auf, dass der Fahrer anhand der Anzeige kontinuierlich überprüfen muss, ob das System ein vorausfahrendes Fahrzeug erkennt und darauf reagiert (*check ACC has detected vehicle*: Stanton & Young, 2005). Die Aufgabe erfordert eine Erkennung des vorausfahrenden Fahrzeugs bzw. dessen Verschwindens in der Anzeige. Diese Objekterkennung kann sowohl anhand von 2D- als auch von 3D-Merkmalen erfolgen.
- Die Bearbeitung der **Aufgabe 4 zum Ablesen des Systemzustands und der eingestellten Wunschgeschwindigkeit** dürfte unabhängig von den Variationen der Anzeigen sein, da die Schrift in allen Anzeigen in der Größe, Farbe und Position identisch war. Aufgabe 4 diente der Kontrolle der experimentellen Manipulation in den anderen Aufgaben.

Die **Wahrnehmungssicherheit** wurde in Experiment 4 zum einen zur Überprüfung der Wirkung der Faktoren *räumliche Kompatibilität* und *visuelle Komplexität* gemessen. Zum anderen diente sie der Absicherung, ob 3D-Anzeigen keine zusätzliche visuelle Beanspruchung für den Fahrer

bedeuten und ob sie eine genaue und schnelle Tiefenwahrnehmung gewährleisten. Unter Wahrnehmungssicherheit wird hier die effektive und effiziente visuelle Aufnahme von Informationen aus Anzeigen verstanden. Sie wurde über die Reaktionszeiten und die Genauigkeit der Distanzurteile in den Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2 sowie über die Reaktionszeiten und Bearbeitungsfehler in der Aufgabe 3 zum Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs und in der Kontrollaufgabe 4 ausgewertet. Da die Richtung der Distanzschätzfehler (über- oder unterschätzen) nicht interessierte und die Fehler auch nicht mit der zu schätzenden Distanz gewichtet werden sollten, wurde als abhängige Variable der Betrag der Abweichung der geschätzten von der tatsächlichen Distanz erhoben (ausführlicher in Häring, 2004). Es wurden Wahrnehmungsaufgaben ausgewählt, die bei der Nutzung der Anzeigen des ART erforderlich sind bzw. auf andere Anzeigen verallgemeinerbare Aussagen über die räumliche Tiefenwahrnehmung zulassen.

Die **Ablenkungswirkung** wurde – wie bereits die Wahrnehmungssicherheit – zur Überprüfung der Wirkung der Faktoren *räumliche Kompatibilität* und *visuelle Komplexität* sowie zur Erfassung möglicher Grenzen von 3D-Anzeigen erhoben. Sie kann im Nutzungskontext Fahrzeug über das Blickverhalten, die Leistung in der primären Fahraufgabe, die Leistung in Nebenaufgaben sowie über Selbsteinschätzungen der Beanspruchung während der Fahrt auf der Straße oder im Fahrsimulator gemessen werden (vgl. ISO 17287 ). Weniger aufwändig und besser standardisiert ist der Einsatz des noch in Entwicklung befindlichen *Lane-Change-Tests* (vgl. ISO TC22/SC13/WG8; Mattes, 2003; Mattes & Hallen, 2007). Da in diesem Testszenario jedoch keine simulierten Fahrten mit dem ART vorgesehen sind, wurde die Ablenkungswirkung der 3D-Anzeigen in einem Fahrsimulatorexperiment untersucht. Es wurden Blick- und Fahrdaten aufgezeichnet, die sowohl über die reine Aufgabenbearbeitungszeit als auch über die gesamte Zeit einer Versuchsfahrt ausgewertet wurden. Letzteres ermöglicht Aussagen über die Wirkung einer Anzeige kurz vor und nach dem Bearbeiten einer Aufgabe sowie über die freie Nutzung der Anzeige, wenn diese für eine Aufgabe gerade nicht benötigt wird.

Die visuelle Ablenkungswirkung wurde über das **Blickverhalten** erhoben, weil zu befürchten war, dass 3D-Anzeigen aufgrund ihrer mutmaßlich größeren Attraktivität eine stärkere „visuelle Anziehungskraft“ auf den Fahrer ausüben sowie bei größerer visueller Komplexität die Aufnahme von Informationen verzögern. Es wurde angenommen, dass die „visuelle Anziehungskraft“ sich insbesondere in der Auswertung über die gesamte Zeit einer Versuchsfahrt während der freien Nutzung der Anzeigen zeigen dürfte. Es wurden die üblichen Messgrößen Anzahl und Dauer der Blicke auf die Anzeigen aufgezeichnet (vgl. ISO 15007-1). Um sicherzustellen, dass ein Blickwechsel

zum Display nicht aus einer einzelnen Sakkade ohne Fixation bestand, wurde dieser erst gewertet, wenn der Blick danach für mindestens 100 ms die Anzeige fixierte (vgl. Rötting, 1999; Seifert, Rötting & Jung, 2001). Da Fahrer nur bis zu einer gewissen zeitlichen Obergrenze bereit sind, den Blick von der Straße abzuwenden und diese Bereitschaft zudem von der visuellen Beanspruchung der Fahraufgabe abhängig ist, stellt die mittlere Blickdauer für sich genommen kein zuverlässiges Maß dar (vgl. ISO 17287). Anstelle dessen wurde die Gesamtblickdauer als Maß mit deutlich größerer Validität und Zuverlässigkeit verwendet (vgl. ISO 17287; AAM-Richtlinie). Diese ergibt sich aus dem Produkt der Blickanzahl und der mittleren Blickdauer. Um eine Vergleichbarkeit der Gesamtblickdauer über die Bedingungen herzustellen, wurde die Gesamtblickdauer als Anteil an der gesamten Fahrzeit bzw. der Aufgabenbearbeitungszeit berechnet. Die absoluten Kriterien der visuellen Ablenkung, dass einzelne Blicke nicht länger als 1.5 s (ISO 15005) bzw. 2 s (AAM-Richtlinie) dauern und die Gesamtblickdauer für eine Aufgabe 15 s (SAE-Richtlinie J2364) bzw. 20 s (AAM-Richtlinie) nicht überschreitet, waren im Zusammenhang von Experiment 4 nicht wichtig, da hier der Fokus auf relativen Vergleichen verschiedener Anzeigen lag.

Die **Leistung in der primären Fahraufgabe** wurde außerdem erfasst, da aus häufigeren und längeren Blicken auf Anzeigen nicht zwingend sicherheitskritische Fahrsituationen entstehen (z.B. Dingus, Antin, Hulse & Wierwille, 1989; Tijerina, Johnston, Parmer, Winterbottom & Goodman, 2000). Dabei wurde sich auf die Messung der Güte der Querregelung beschränkt, da der ART die Längsregelung vollständig übernimmt. Als kontinuierliche Ablenkungsindikatoren wurden die Streuung der lateralen Position und die Streuung des Lenkwinkels aufgezeichnet. Diese Maße spiegeln die aus dem Alltag bekannte Erfahrung wider, dass ein abgelenkter Fahrer in seiner Spur Schlangenlinien fährt und dabei sehr unruhig und schnell sein Lenkrad abwechselnd nach rechts und links dreht. Die Sensitivität, Validität und Reliabilität beider Streuungsmaße wurden unter den kontrollierten Bedingungen von Simulatorfahrten hinreichend belegt (vgl. ISO 17287; Bengler, Huesmann & Praxenthaler, 2003; Bengler et al., 2004; Carsten et al., 2005; Reed & Green, 1999; Schattenberg, 2002). Darüber hinaus wurde entsprechend der Vorschläge der AAM-Richtlinie (2006) als Maß mit direkter Verbindung zu kritischen Fahrsituationen die Anzahl der Spurüberschreitungen erfasst. Dieses Maß ist aufgrund dieser selten auftretenden Ereignisse nicht so zuverlässig wie die beiden zuvor erwähnten.

Neben der Wahrnehmungssicherheit und der Ablenkungswirkung wurde die **subjektive Bewertung der Nützlichkeit und der Attraktivität** von 3D-Anzeigen im Vergleich zu 2D-Anzeigen anhand von sechs Fragen erfasst,

die sowohl nach jeder Anzeige auf einer fünfstufigen Ratingskala als auch am Ende des Experiments anhand von Rangreihen aller Anzeigen beantwortet wurden (s. Anhang D). Die absoluten Bewertungen nach jeder Anzeige wurden für einen späteren Vergleich der Ergebnisse der Experimente 4 und 5 erhoben. Die relativen Bewertungen am Ende des Experiments in Form von Rangreihen haben gegenüber den Ratingskalen den Vorteil, Entscheidungen zwischen den Anzeigen zu forcieren und entsprachen methodisch der Erfassung der subjektiven Bewertung der Nützlichkeit und Attraktivität in Experiment 2. Es wurden in Experiment 4 lediglich weitere Fragen zur Erfassung der Nützlichkeit aufgenommen, da mehr und realitätsnähere Anwendungssituationen der Anzeigen untersucht wurden. Es wurden vergleichbare Ergebnisse wie in Experiment 2 erwartet, d.h. eine bessere Bewertung der Nützlichkeit und der Attraktivität von 3D-Anzeigen im Vergleich zu 2D-Anzeigen.

Die Hypothesen zum Einfluss des Faktors *räumliche Kompatibilität* wurden mit Anzeigen vergleichbarer visueller Komplexität überprüft: 3D-komplex-15° und 3D-komplex-22.5°, 3D-einfach-22.5° und 2D-Draufsicht, 2D-Draufsicht und 2D-Seitenansicht.

- **Hypothese 1:** Je kompatibler die Anzeige ist, desto leichter fällt der Abgleich der Anzeige mit der Außensicht, d.h. desto genauer und schneller werden die Wahrnehmungsaufgaben bearbeitet und desto geringer ist die Ablenkungswirkung.
- **Gegenhypothese zu Hypothese 1:** Je größer die Auflösung in der Tiefe ist, desto genauer und schneller werden Wahrnehmungsaufgaben bearbeitet und desto geringer ist die Ablenkungswirkung.

Die Hypothese zum Einfluss des Faktors *visuelle Komplexität* wurde mit Anzeigen identischer räumlicher Kompatibilität überprüft: 3D-einfach-22.5° und 3D-komplex-22.5°.

- **Hypothese 2:** Bei geringer visueller Komplexität werden die Wahrnehmungsaufgaben genauer und schneller bearbeitet und die Ablenkungswirkung ist geringer als bei höherer visueller Komplexität.

Die Hypothese zur Kontrollaufgabe 4 wurde mit allen Anzeigen überprüft.

- **Hypothese 3:** Die Variation der Faktoren *räumliche Kompatibilität* und *visuelle Komplexität* hat keinen Einfluss auf die Bearbeitung der Kontrollaufgabe und die dabei auftretende Ablenkungswirkung.

Die Hypothese zur subjektiven Bewertung des Nutzens und der Attraktivität wurde mit allen Anzeigen überprüft.

- **Hypothese 4:** Wegen ihrer größeren räumlichen Kompatibilität und Bildhaftigkeit werden 3D-Anzeigen als nützlicher und attraktiver eingeschätzt als 2D-Anzeigen.

## 11.2 Methode

### 11.2.1 Versuchsplan

Der Versuchsplan bestand aus einer unvollständigen Kombination der Faktoren *räumliche Kompatibilität* (vier Stufen von gering bis hoch) und *visuelle Komplexität* (einfach, komplex). Es wurden insgesamt fünf Anzeigen realisiert (s. Tab. 11-1 und Abb. 11-1) Die Reihenfolge der Anzeigen wurde randomisiert. Die Reihenfolge der vier Aufgabentypen wurde permutiert und zufällig den Probanden zugeordnet. Mit jeder der fünf Anzeigen bearbeitete ein Proband die vier Aufgabentypen in der zugeordneten Reihenfolge. Mit einer Anzeige wurden alle vier Aufgabentypen im Block bearbeitet. Jeder Aufgabentyp wurde während einer dreiminütigen Versuchsfahrt für sich allein bearbeitet, wobei 10 Aufgabenwiederholungen auftraten. Abhängige Variablen waren der Betrag der Abweichung der geschätzten von der tatsächlichen Distanz in Prozent bzw. die Bearbeitungsfehler in Prozent, die Reaktionszeit in Millisekunden, die Blickdaten (Blickanzahl und Blickdauer über die gesamte Fahrzeit und die Aufgabenlösungszeit), die Fahrdaten (Streuung der lateralen Position in Zentimetern, Streuung des Lenkwinkels in Grad und Anzahl der Spurüberschreitungen über die gesamte Fahrzeit und die Aufgabenlösungszeit) sowie die mittleren Rangplätze in der subjektiven Bewertung der Anzeigen.

**Tabelle 11-1: Versuchsplan für Experiment 4**

Anzeigen-Nr.	1	2	3	4	5
Anzeige	2D-Seitenansicht	2D-Draufsicht	3D-einfach-22.5°	3D-komplex-22.5°	3D-komplex-15°
Azimut	90°	0°			
Höhenwinkel	0°	90°	22.5°		15°
Auflösung in der Tiefe	Stufe 1 (maximal)		Stufe 2		Stufe 3 (gering)
Faktor <i>räumliche Kompatibilität</i>	Stufe 1 (gering)	Stufe 2	Stufe 3		Stufe 4 (hoch)
Faktor <i>visuelle Komplexität</i>	visuell einfach			visuell komplex	
Aufgabentyp 1	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
Aufgabentyp 2	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
Aufgabentyp 3	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>
Aufgabentyp 4	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>

Anmerkungen: N<sub>1</sub> ist eine Stichprobe.

### **11.2.2 Versuchsteilnehmer**

An der Untersuchung nahmen 32 Versuchspersonen teil, von denen sechs aufgrund von Simulatorkrankheit und Aufzeichnungsfehlern aus den statistischen Analysen ausgeschlossen werden mussten. Die verbleibenden 26 Probanden (11 Frauen, 15 Männer) hatten ein durchschnittliches Alter von 41.1 Jahren ( $SD = 8.6$ , 25 bis 57 Jahre). Die Mercedes-Kunden erhielten eine Aufwandsentschädigung von 60 EUR, die vier Mitarbeiter der Daimler-Chrysler AG nicht. Die Versuchspersonen vertraten ein breites Spektrum an Berufsgruppen und Bildungsabschlüssen und wurden wie in Experiment 3 akquiriert. Mit dem Sehtestgerät aus Experiment 1 wurde sichergestellt, dass kein Proband mit weniger als 0.7 Visus Nah- oder Fernsehschärfe an der Untersuchung teilnahm. Vier Probanden trugen Kontaktlinsen. Brillenträger wurden wegen der kamerabasierten Blickerfassung nicht akquiriert. Tempomat und technische Anwendungen (Word, E-Mail, Internet, SMS, PDA) wurden von fast allen regelmäßig genutzt, Abstandsregeltempomat, Geschwindigkeitsbegrenzer und 3D-Anwendungen (Spiele, Simulationen, AR/VR-Anwendungen, CAD, 3D-Modellierungs-tools) selten bis gar nicht. Kein Proband hatte den Abstandsregeltempomaten im eigenen Fahrzeug und nur vier hatten ihn bisher getestet. Alle Versuchsteilnehmer waren erfahrene Autofahrer ( $> 10.000$  km Jahresfahrleistung,  $> 5$  Jahre Fahrerfahrung).

### **11.2.3 Apparatur**

Das Experiment fand im Mai 2005 im Fahrsimulator der Daimler AG in Stuttgart-Untertürkheim statt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 11-2 dargestellt. Die statische Fahrkabine war eine Mercedes Benz E-Klasse (W211, 2003) mit haptischem Feedback am Lenkrad und an den Pedalen. Das Kombiinstrument war mit dem gleichen TFT LC-Display wie in Experiment 3 ausgestattet. Der Abstand zwischen Fahrer und Display variierte zwischen 70 cm und 90 cm. In allen Berechnungen wurde ein mittlerer Displayabstand von 80 cm verwendet.

Die virtuelle Fahrszene wurde auf eine Leinwand von 4 m Breite ( $46.5^\circ$ ) und 3 m Höhe ( $38.3^\circ$ ) projiziert, die sich im Abstand von ca. 3.8 m vom Fahrer befand. Ein Soundsystem erzeugte über die Fahrzeuglautsprecher realistische Reifen-, Motor-, Wind- und Gegenverkehrgeräusche. Für die Blickerfassung wurden drei Infrarotkameras (Fa. Sony, Typ HR-50, Linse 8.0 mm) und zwei Infrarotlichtquellen in das Simulatorfahrzeug eingebaut. Die Aufzeichnung der Blicke erfolgte mit Hilfe der Software Smarteye Pro 3.0.2 nach dem Prinzip der Bilderkennung. Es wurden das Kombiinstrument-Display (inkl. 5 cm Rand) und die Leinwand (inkl. 2 m Rand) als Objekte für die Blickerfassung definiert. Fahrsimulation, Bildsystem der Fahrsimulation, Soundsystem,



Anzeigen im Kombiinstrument und Blickerfassung liefern auf leistungsfähigen PC mit 3D-fähigen Grafikkarten.



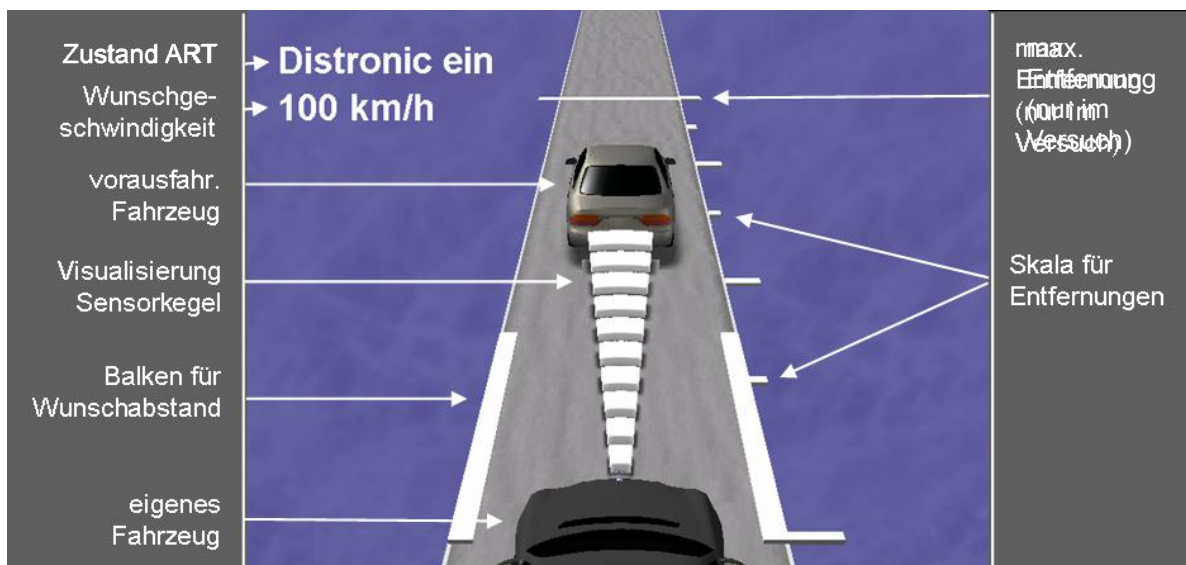
**Abbildung 11-2: Versuchsaufbau für Experiment 4**

Über die Fahrzeuglautsprecher wurde in den Aufgaben 1, 2 und 4 ein Hinweiston zu Beginn der Aufgabe ausgegeben (200 ms, Bestätigungsgeschall), dessen Lautstärke sich die Probanden zu Beginn selbst einstellten. Die Reaktionen der Probanden wurden für die Aufgaben 1 und 2 (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug und Wunschabstand) über einen *Voicekey* eingegeben. Der Voicekey ist eine Eigenentwicklung der Daimler AG und verwendet die im Fahrzeug serienmäßig für die Spracheingabe verbauten Richtmikrophone. In den Aufgaben 3 und 4 (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs und Kontrollaufgabe) wurden die Reaktionen der Probanden über die oberen beiden Lenkradtasten eingegeben, die speziell markiert waren (s. Abb. 11-2). Das Versuchssteuerungsprogramm und die Datenaufzeichnung liefen auf einem Laptop (s. Abb. 11-2). Folgende Daten wurden in Zyklen von 100 Hz aufgezeichnet: Auslösung Voicekey, Betätigung Lenkradtasten, Fahrdaten (laterale Position, Lenkwinkel, Anzahl Spurüberschreitungen, Geschwindigkeit, Betätigung Bremse und Gas), Informationen über den Abstandsregeltempomaten und dessen Anzeige (Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug, angezeigter Wunschabstand, Anzeigenart, angezeigter Systemzu-

stand ein/aus/passiv, angezeigte Wunschgeschwindigkeit, vorausfahrendes Fahrzeug erkannt/nicht erkannt) und Informationen über die Versuchsaufgabe (Bedingung, Aufgabe, Reaktionszeit, Missing, Distanzschätzwert). Die Blickdaten wurden in Zyklen von 60 Hz erfasst.

### 11.2.4 Versuchsreize

Die visuell komplexe 3D-Anzeige entsprach im Wesentlichen der Anzeige aus Experiment 3. Sowohl die visuell komplexen als auch die visuell einfachen 3D-Anzeigen wurden detailliert in Kapitel 9 beschrieben und in Abbildung 11-1 dargestellt. Die geometrischen Parameter der Anzeigen entsprachen denen in Experiment 3 (s. Anhang D, Tab. D-1). Alle Anzeigen wurden inhaltlich identisch (s. Abb. 11-3) und graphisch vergleichbar bei einer Bildgröße von 736 x 552 Pixel umgesetzt. In den 2D-Anzeigen wurde die Größe der Fahrzeuge von deren mittlerer Größe in den 3D-Anzeigen abgeleitet und so verkleinert, dass zwischen ihnen ausreichend Platz für die Darstellung des Abstandes verblieb. Linienstärken, Linienlängen, die Sensorlinien und die Breite der Straße wurden in den 2D-Anzeigen so angepasst, dass sie dem Mittelwert dieser Größen in den 3D-Anzeigen entsprachen.



**Abbildung 11-3: Inhalt der Anzeigen für Experiment 4**

Die visuell einfachen Anzeigen (2D-Seitenansicht, 2D-Draufsicht, 3D-einfach-22.5°) basierten auf dem gleichen abstrakten 3D-Fahrzeugmodell, das in den gewählten Perspektiven unterschiedliche *Renderings*<sup>5</sup> ergab. In die 2D-Anzeigen wurden zur besseren Erkennbarkeit der Fahrzeuge weiße Konturen eingefügt. Die 2D-Draufsicht enthielt geringfügig mehr graphische

<sup>5</sup> Rendering ist ein Fachbegriff aus dem Bereich der 3D-Modellierung und steht für die Berechnung und Visualisierung einer speziellen Ansicht aus dem 3D-Modell eines Objektes oder einer Szene.

Details als die 2D-Seitenansicht und die Anzeige 3D-einfach-22.5° wiederum geringfügig mehr Details als die 2D-Draufsicht.

### ***11.2.5 Durchführung und Versuchsaufgaben***

Das Experiment dauerte mit jedem Probanden ca. zwei Stunden und 30 Minuten. Den Probanden wurden der Ablauf des Versuches, die Funktionsweise des Abstandsregeltempomaten und die Anzeigen erläutert. Sie füllten einen demographischen Fragebogen aus und führten einen Sehtest durch. Gleichzeitig wurde von einer zweiten Versuchsleiterin das Kopf- und Augenmodell für die kamerabasierte Blickerfassung erstellt. Danach wurde die Blickerfassung kalibriert und den Probanden die Fahraufgabe und die Besonderheiten des Fahrens im Fahrsimulator erklärt.

Die Probanden sollten nur mit dem Abstandsregeltempomaten fahren, d.h. lenken, kein Gas geben und nur im Notfall bremsen. Anhand der Fahrdaten konnte festgestellt werden, ob diese Anweisung eingehalten wurde. Um eine unnötige Variationsquelle wegen der Bedienung des Systems durch die Probanden auszuschließen, wurde der Abstandsregeltempomat bei einer Geschwindigkeit von größer als 0 km/h automatisch mit einer Wunschgeschwindigkeit von 100 km/h und einem Wunschabstand von 1.5 s (*time-to-collision*) eingeschaltet. Sobald ein Proband das System durch das Betätigen der Bremse kurzzeitig ausschaltete, wurde es sofort automatisch wieder eingeschaltet. Die Probanden folgten entsprechend der Instruktion während der gesamten Fahrt einem vorausfahrenden Fahrzeug in der rechten Spur einer zweispurigen Landstraße und überholten nicht. Die unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofile des vorausfahrenden Fahrzeugs für die Aufgaben 1, 2, 3 und 4, die notwendig waren, um die gewünschten Effekte in den Anzeigen zu provozieren, sind Tabelle 11-2 zu entnehmen. In keinem Geschwindigkeitsprofil war eine Situation enthalten, in der eine stärkere Bremsung des eigenen Fahrzeugs als  $-2 \text{ m/s}^2$  notwendig war, so dass keine Warnmeldungen des Abstandsregeltempomaten vorkamen. Für jeden Geschwindigkeitsprofiltyp gab es drei Realisierungen. Diese Variation der Geschwindigkeitsprofile diente dazu, keine Gewöhnung eintreten zu lassen. Jede dreiminütige Versuchsfahrt begann am Anfang der Strecke mit einem neuen Geschwindigkeitsprofil und hatte eine maximale Streckenlänge von 5 km. Die Landstraße war mit Radien von 750 m bis 250 m sehr kurvig, der maximale Höhenunterschied betrug 13 m, beidseitig gab es Häuser, Straßenschilder und Werbetafeln und auf der linken Spur fuhr permanent Gegenverkehr. Die Kurvigkeit der Strecke diente dazu, die an sich leichte Fahraufgabe zu erschweren, die durch die Anwendung des Abstandsregeltempomaten nur in der Spurführung bestand. Im Fahrsimulator ist die Spurführung beim Fahren von Kurven zudem schwieriger als im realen Fahrzeug, da die Lenkung über kein Rückstellmoment verfügt.

**Tabelle 11-2: Geschwindigkeitsprofile vorausfahrendes Fahrzeug für Experiment 4**

	<b>Aufgabe 1</b>	<b>Aufgabe 2</b>	<b>Aufgaben 3 und 4</b>
<b>Geschwindigkeit (v)</b>	50 bis 125 km/h	50 bis 110 km/h	70 bis 100 km/h
<b>Beschleunigung</b>	0.9 bis 1.7 m/s <sup>2</sup>	1.2 bis 1.7 m/s <sup>2</sup>	0.5 bis 1 m/s <sup>2</sup>
<b>Verzögerung</b>	-0.9 bis -1.7 m/s <sup>2</sup>	-1.5 bis -3.5 m/s <sup>2</sup>	-0.5 bis -1 m/s <sup>2</sup>
<b>Zeiten v = konstant</b>	4-6s	4-6s	4-6s
<b>Anzahl Realisierungen</b>	3x	3x	3x

Anmerkung: Aufgabe 1 = Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug, Aufgabe 2 = Distanzschätzung Wunschatstand, Aufgabe 3 = Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs, Aufgabe 4 = Kontrollaufgabe. Obwohl in den Geschwindigkeitsprofilen der Aufgabe 2 maximale Verzögerungen des vorausfahrenden Fahrzeugs von -3.5 m/s<sup>2</sup> vorkamen, musste das eigene Fahrzeug nie stärker als mit einer Verzögerung von -2m/s<sup>2</sup> abgebremst werden.

Während des Einfahrens im Simulator kalibrierte die Versuchsleiterin den Voicekey auf die Stimme des jeweiligen Probanden. Danach wurden die vier Aufgabentypen anhand der ersten Anzeige erklärt und jeweils mit mindestens 10 Übungsaufgaben trainiert, bis die Aufgaben sicher ausgeführt wurden. Ab der zweiten Anzeige wurde lediglich eine Kurzform der Instruktion zur jeweiligen Aufgabe wiederholt. Die ersten beiden Aufgaben jeder dreiminütigen Versuchsfahrt mit einer Anzeige und einem Aufgabentyp dienten der Umgewöhnung auf die Bearbeitung des neuen Aufgabentyps und wurden nicht ausgewertet. Die folgenden 10 Wiederholungen wurden ausgewertet.

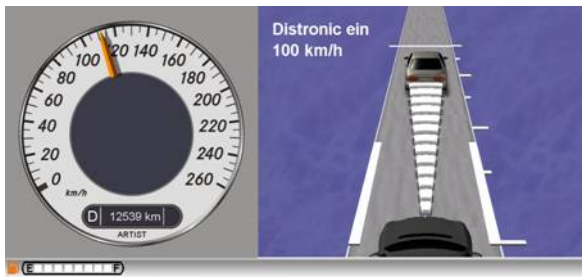
Die vier Aufgabentypen waren angelehnt an Aufgaben, die mit Hilfe der Anzeige des Abstandsregeltempomaten während der Fahrt zu bearbeiten sind (s. Abschn. 11.1 und 4.4). Die Aufgabe 1 zur Distanzschätzung zum vorausfahrenden Fahrzeug sollte darüber hinaus einen Vergleich der Ergebnisse der Experimente 2 und 4 sowie allgemeine Aussagen über die Güte der räumlichen Tiefenwahrnehmung in 3D-Anzeigen ermöglichen.

In **Aufgabe 1 (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug)** gaben die Probanden nach einem Hinweiston an, in welcher Distanz sich das vorausfahrende Fahrzeug vom eigenen Fahrzeug in der Anzeige befand. Diese Aufgabe war der Distanzschätztaufgabe in Experiment 2 entlehnt. Die Versuchsleiterin wies darauf hin, dass die Schätzung sowohl schnell als auch genau vorgenommen werden sollte. Die Aufgabe war so angelegt, dass die Distanzschätzung nicht mit Hilfe der Fahrsimulation, sondern nur mit Hilfe der Anzeige bewältigt werden konnte. Die Probanden mussten ihr Distanzurteil als Prozentwert des maximal möglichen Abstandes angeben. Der maximal mögliche Abstand von 100% war in der Anzeige durch eine Linie gekennzeichnet (s. Abb. 11-3). Die Probanden gaben ihr Urteil ab, indem sie eine Zahl zwischen 1 und 100 nannten und lösten damit den Voicekey aus. Der Schätzwert wurde von der Versuchsleiterin in die Versuchssteuerung eingege-

ben. Eine Verwendung des Schiebereglers aus Experiment 2 wurde verworfen, da hiermit während der Fahrt keine zuverlässigen Eingaben erwartet wurden. Die Trigger für den Aufgabenbeginn wurden zufällig über die dreiminütige Versuchsfahrt verteilt. Die Parameter des Geschwindigkeitsprofils der Aufgabe 1 waren so gewählt, dass ein breites Spektrum von Distanzen geschätzt wurde und sich ausreichend häufig Veränderungen im Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug ergaben. Die Instruktionen und der generelle Ablauf wurden in den Aufgaben 2 bis 4 analog gehandhabt.



Beispiel 1: „0“ = genau eingehalten



Beispiel 2: „100 plus“ = 100% überschritten



Beispiel 3: „20 minus“ = 20% unterschritten

#### Abbildung 11-4: Durchführung der Aufgabe 2 für Experiment 4

In Aufgabe 2 wurde eine Distanzschätzung vorgenommen, inwieweit der Wunschabstand unter- oder überschritten wurde bzw. genau eingehalten wurde. Die dicken weißen Linien beiderseits der Straße stellten den eingestellten Wunschabstand dar. Es sind drei Beispiele illustriert.

**Aufgabe 2 (Distanzschätzung Wunschabstand)** erforderte eine relative Distanzschätzung sehr kleiner Distanzen. Die Probanden sollten angeben, um wieviel Prozent der aktuelle Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug den eingestellten Wunschabstand unter- oder überschritt bzw. ob letzterer genau eingehalten wurde (s. Abb. 11-4). Die Anzeige des Wunschabstandes änderte permanent ihre Länge, da der Wunschabstand technisch gesehen ein Zeitabstand ist (*time-to-collision*). Die jeweils aktuelle Länge des weißen Balkens für den Wunschabstand entsprach 100%. Wurde der Wunschabstand genau eingehalten, sollten die Probanden die Zahl „Null“ nennen, wurde er unterschritten bzw. überschritten, den jeweiligen Prozentsatz gefolgt von einem „minus“ bzw. „plus“. Überschritten werden konnte der Wunschabstand um mehr als 100%. Im Geschwindigkeitsprofil wurden starke Beschleunigungen und Verzögerungen umgesetzt, um geeignete Situationen für die Schätzung zu



produzieren. Auch diese Aufgabe konnte nur mit der Anzeige und nicht anhand der Projektion der Fahrsimulation gelöst werden.

**Aufgabe 3 (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs)** hatte den Charakter einer freien Fahrt, bei der der Fahrer von Zeit zu Zeit auf das Display schaut und bemerkt, dass der ART das vorausfahrende Fahrzeug nicht erkennt und demzufolge gerade nicht darauf regelt. Die Probanden waren darüber informiert, dass sie diese Veränderung nur anhand der Anzeige erkennen konnten. Die Szenarien der Fahrsimulation und die Simulation des ART waren deshalb gezielt so umgesetzt, dass immer einem vorausfahrenden Fahrzeug gefolgt wurde und dieses vom Abstandsregeltempomaten immer zuverlässig erkannt wurde. Es änderte sich somit nichts im Regelungsverhalten des ART (was die Probanden im Fahrsimulator hätten spüren können), sondern nur in der Anzeige. Damit der Beginn einer Aufgabe wie bei der realen Nutzung des ART für die Probanden nicht erkennbar war, wurde kein Hinweiston ausgegeben. Die Probanden waren instruiert, immer wieder auf die Anzeige zu schauen und sobald dort kein vorausfahrendes Fahrzeug mehr zu sehen war, so schnell wie möglich die linke Lenkradtaste zu drücken.

**Aufgabe 4 (Kontrollaufgabe)** diente der Kontrolle der Zuverlässigkeit der Ergebnisse in den Aufgaben 1 bis 3. Die Probanden lasen nach einem Hinweiston den aktuellen Systemzustand (ein/ aus/ passiv) und die Wunschgeschwindigkeit (80 bis 100 km/h in 5 km/h-Schritten) in der Anzeige ab und entschieden, welche der beiden Angaben sich im Vergleich zu vorher verändert hatte. Die Probanden wurden darüber informiert, dass sie diese Änderungen nur in den Anzeigen erkennen konnten. Wie bereits in Aufgabe 3 wurden die Zustände (permanent eingeschaltet) und das Regelungsverhalten (Wunschgeschwindigkeit 100 km/h) des Abstandsregeltempomaten absichtlich nicht verändert, damit die Änderungen wirklich nur mit Hilfe der Anzeige erfasst werden konnten. Bei einer Änderung in der Anzeige des Systemzustands drückten die Probanden die linke Lenkradtaste und bei einer Änderung in der Anzeige der Wunschgeschwindigkeit die rechte Lenkradtaste.

Nach jeder Anzeige wurden die Fragen zur subjektiven Bewertung der Nützlichkeit und der Attraktivität der Anzeigen vorgelegt (s. Anhang D). Am Ende des Experiments brachten die Probanden alle Anzeigen hinsichtlich der gleichen Fragen in Rangreihen.

### 11.3 Ergebnisse

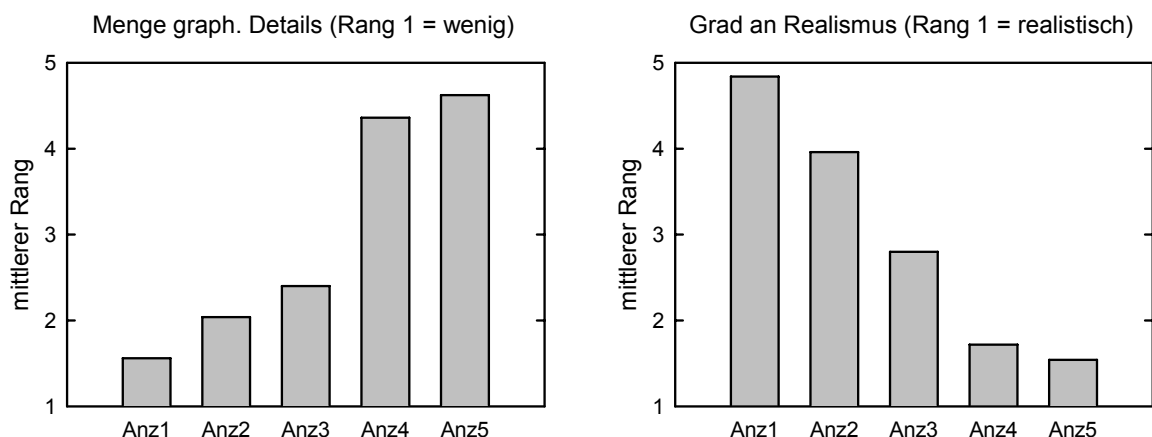
Die statistischen Analysen wurden analog zu den Experimenten 1 und 2 durchgeführt. Es wurde für jede abhängige Variable eine univariate einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung über die fünf Anzeigen gerechnet. Die Normalverteilungsannahme wurde für 7 von 202 Variablen nicht bestätigt.

Die entsprechenden parameterfreien Verfahren erbrachten keine abweichenden Ergebnisse. Ein Proband wurde aus allen Analysen der Aufgabe 3 ausgeschlossen, weil er diese nicht instruktionsgemäß bearbeitete. Für die Auswertung der Rangreihen zur subjektiven Bewertung des Nutzens und der Attraktivität wurden der Friedmann-Test und der Wilcoxon-Test eingesetzt. Die Ergebnisse wurden aus Gründen der Anschaulichkeit auch für kategoriale unabhängige Variablen in Liniendiagrammen dargestellt. Die statistischen Kennwerte sind in Anhang D in den Tabellen D-5 bis D-8 zu finden.

Die Parameter des Versuchsszenarios unterschieden sich nicht zwischen den Anzeigen. Deren Wertebereiche sind in Anhang D in Tabelle D-2 aufgeführt.

### ***11.3.1 Visuelle Komplexität: Kontrolle der experimentellen Manipulation***

Um zu überprüfen, ob sich die Anzeigen in der visuellen Komplexität wie erwartet unterschieden, wurden die Probanden am Ende des Versuches gebeten, alle Anzeigen in Rangreihen zur Menge der graphischen Details und zum Grad an Realismus zu bringen (s. Abb. 11-5). In beiden Fällen führte die Variation in der Gestaltung der Anzeigen zu signifikanten Unterschieden in der erwarteten Richtung (s. Anhang D, Tab. D-8).



**Abbildung 11-5: Ergebnisse graphische Details und Realismus für Experiment 4**

Links wird über die mittleren Rangplätze bei der subjektiven Bewertung der Menge an graphischen Details informiert, rechts für den Grad an Realismus. Die visuell einfachen Anzeigen waren die Anzeige 1 = 2D-Seitenansicht, Anzeige 2 = 2D-Draufsicht und Anzeige 3 = 3D-einfach-22.5°. Die visuell komplexen Anzeigen waren die Anzeige 4 = 3D-komplex-22.5° und die Anzeige 5 = 3D-komplex-15°. ( $N = 25$ ).

### ***11.3.2 Wahrnehmungssicherheit: Abweichung der Distanzschätzung, Reaktionszeiten und Bearbeitungsfehler***

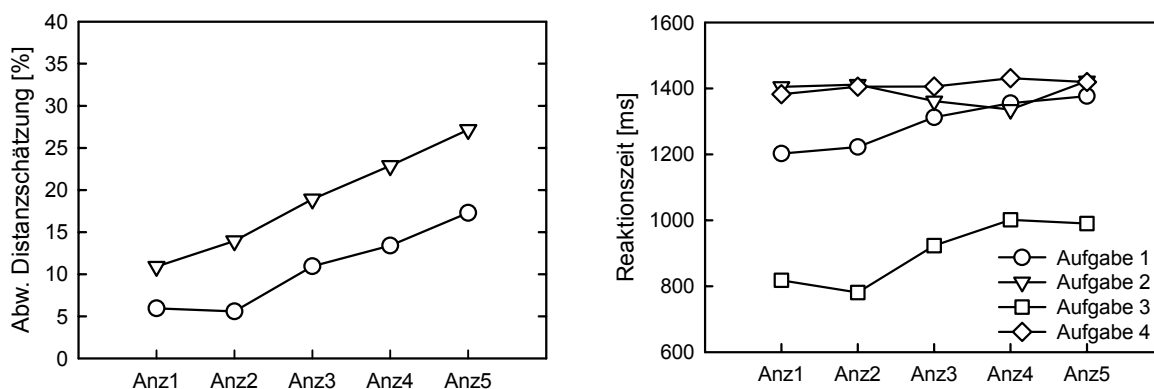
#### ***Abweichung der Distanzschätzung***

Aus den Reaktionen der Probanden, die nicht als Missing markiert waren, wurde für jede Bedingung der Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2 der mittlere Betrag der Abweichungen der geschätzten von den tatsächlichen Distanzen

errechnet. Anhand der absoluten Abweichungen wurde festgestellt, dass die Probanden die Distanzen leicht überschätzten.

Für **Aufgabe 1** (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug) ergab sich ein signifikanter Effekt,  $F(4, 100) = 59.63, p < .001$ . Die mittleren Abweichungen der Distanzschätzung betrugen für Anzeige 1 bis Anzeige 5 6.0%, 5.6%, 11.0%, 13.4% und 17.3%. Wie Abbildung 11-6 zu entnehmen ist, unterschied sich die Distanzschätzung nicht zwischen den Anzeigen 1 und 2, wurde aber von Anzeige 2 bis hin zu Anzeige 5 immer schlechter. Jeder dieser Unterschiede war mindestens auf dem 5%-Niveau signifikant.

Auch in **Aufgabe 2** (Distanzschätzung Wunschabstand) gab es einen signifikanten Effekt,  $F(4, 100) = 29.58, p < .001$ . In Abbildung 11-6 ist der Anstieg der Abweichung der Distanzschätzung von Anzeige 1 bis Anzeige 5 zu erkennen: 10.9%, 13.9%, 18.9%, 22.9%, 27.2%. Jeder dieser Unterschiede war mindestens auf dem 5%-Niveau signifikant.



#### Abbildung 11-6: Ergebnisse Wahrnehmungssicherheit für Experiment 4

Die linke Abbildung informiert über die Genauigkeit der Distanzschätzung in Abhängigkeit der Anzeigen 1 bis 5 (2D-Seitenansicht, 2D-Draufsicht, 3D-einfach-22.5°, 3D-komplex-22.5°, 3D-komplex-15°) sowie der Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2. Die Genauigkeit der Distanzschätzung wird als Betrag der Abweichung des Schätzwertes vom realen Wert angegeben. 100% entsprechen der maximal zu schätzenden Distanz. In der rechten Abbildung sind die Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Anzeigen 1 bis 5 sowie der Aufgaben 1 bis 4 (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug und Wunschabstand, Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs, Kontrollaufgabe) dargestellt. ( $N = 26$ ).

#### Reaktionszeiten

In den Aufgaben 1 und 2 wurden aus den Reaktionen der Probanden, die nicht als Missing markiert waren, die mittleren Reaktionszeiten für jede Bedingung errechnet. Es fehlten die Messwerte, in denen der Voicekey fälschlicherweise zu schnell ( $< 200$  ms) bzw. gar nicht ausgelöst hatte (s. Anhang D, Tab. D-3). In den Aufgaben 3 und 4 wurden aus den fehlerfreien Reaktionen die mittleren Reaktionszeiten berechnet.



Für **Aufgabe 1** (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug) ergab sich - wie schon bei den Distanzurteilen - ein signifikanter Effekt,  $F(4, 100) = 5.19$ ,  $p < .01$ . Abbildung 11-6 zeigt einen Anstieg in den Reaktionszeiten von Anzeige 1 zu Anzeige 5. Die Mittelwerte betrugen 1202 ms, 1222 ms, 1312 ms, 1353 ms und 1377 ms. In den Einzelvergleichen wurde jedoch nur der Unterschied zwischen den Anzeigen 2 und 3 signifikant.

Die Varianzanalyse erbrachte für **Aufgabe 2** (Distanzschätzung Wunschabstand) im Gegensatz zu den Ergebnissen in Aufgabe 1 keinen signifikanten Effekt. Abbildung 11-6 zeigt ähnliche Reaktionszeiten für die Anzeigen 1, 2 und 5. Die Mittelwerte der Reaktionszeiten betrugen von Anzeige 1 bis Anzeige 5 1405 ms, 1412 ms, 1361 ms, 1336 ms und 1422 ms. Die Reaktionszeiten waren bei den Anzeigen 3 und 4 kürzer als bei den restlichen Anzeigen, aber nur der Unterschied zwischen den Anzeigen 4 und 5 war signifikant.

In den Reaktionszeiten der **Aufgabe 3** (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs) zeigte sich ein signifikanter Effekt,  $F(4, 96) = 15.07$ ,  $p < .001$ . Die mittleren Reaktionszeiten betrugen von Anzeige 1 bis Anzeige 5 818 ms, 781 ms, 923 ms, 1001 ms und 990 ms. Der Unterschied zwischen den Anzeigen 2 und 3 war auf dem 1%-Niveau signifikant und zwischen den Anzeigen 3 und 4 zumindest tendenziell signifikant.

In der **Kontrollaufgabe 4** gab es bei mittleren Reaktionszeiten von 1409 ms keinen signifikanten Effekt.

### Bearbeitungsfehler

In **Aufgabe 3** wurden die Fehler nicht ausgewertet, weil diese insgesamt nur in 1.5% der Fälle vorkamen (Verpassen, wenn vorausfahrendes Fahrzeug nicht erkannt; unnötiges Drücken der Lenkradtasten, obwohl vorausfahrendes Fahrzeug angezeigt). In **Kontrollaufgabe 4** unterliefen zwar mit 2.8% etwas mehr Fehler (rechte und linke Lenkradtaste verwechselt), aber auch dieser Prozentsatz war unerheblich, wenn man betrachtet, dass eine falsche Aufgabe pro Bedingung bereits einen Fehleranteil von 10% bedeutet hätte.

### Zusammenfassung Wahrnehmungssicherheit

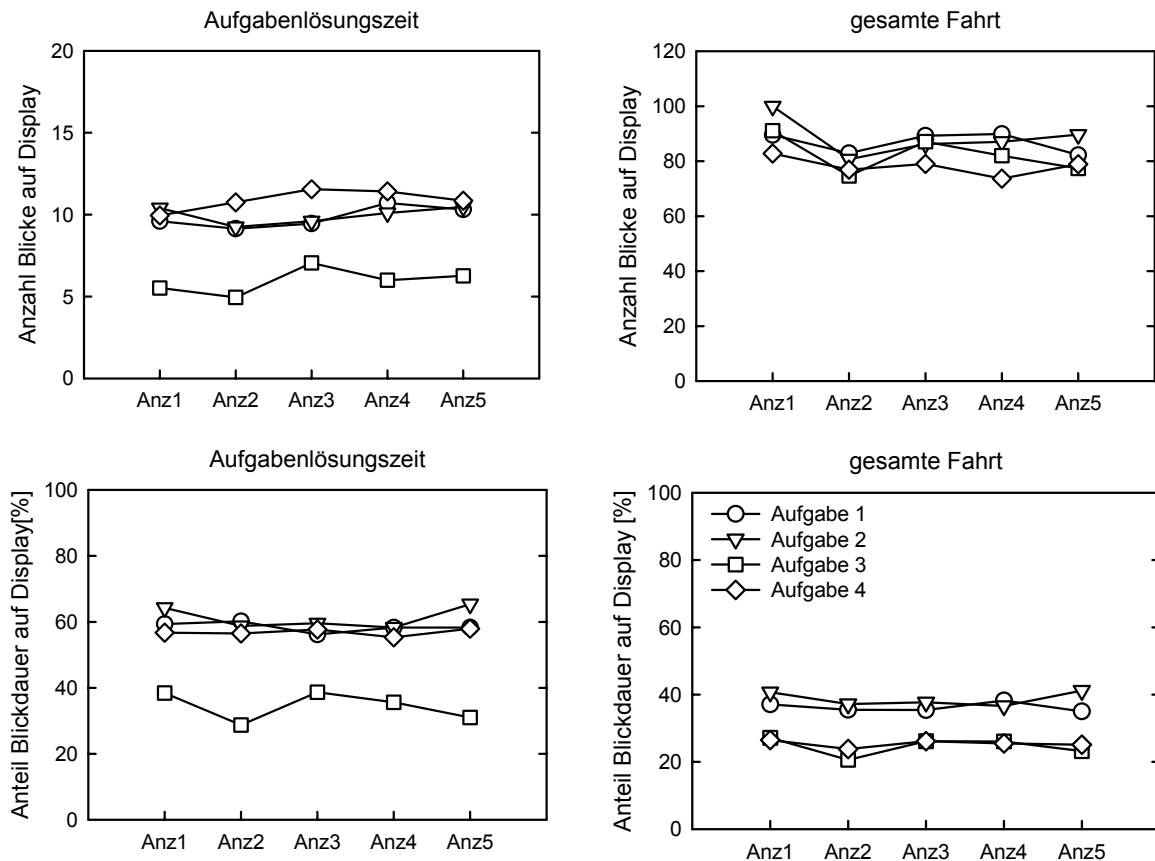
- Bei größerer räumlicher Kompatibilität (d.h. flacheren Höhenwinkeln) überwogen in der Geschwindigkeit und in der Genauigkeit der Distanzschätzungen (Aufgaben 1 und 2) die Nachteile der geringeren Auflösung in der Tiefe. Es gab in den Ergebnissen keine Hinweise darauf, dass durch die kompatibleren Höhenwinkel der 3D-Anzeigen der Abgleich mit der Außenwelt erleichtert wurde. Die Reaktionszeiten der Aufgabe 2 (Distanzschätzung Wunschabstand) bildeten dieses Ergebnis nicht ab, vermutlich da sich

die größere Aufgabenschwierigkeit ungleichmäßig auf die Geschwindigkeit und auf die Genauigkeit der Distanzurteile auswirkte.

- Bei vergleichbarer räumlicher Kompatibilität war die visuell einfache Anzeige 3D-einfach-22.5° in der Bearbeitung der Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2 insgesamt wie erwartet effizienter als die visuell komplexe Anzeige 3D-komplex-22.5°.
- Die Ergebnisse zur Aufgabe 3 (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs) waren uneinheitlich und dadurch schwer interpretierbar. Der signifikante Anstieg der Reaktionszeiten von der 2D-Draufsicht zur Anzeige 3D-einfach-22.5° ließ auf einen Einfluss der räumlichen Kompatibilität schließen, der sich aber beim Vergleich der Anzeigen 3D-komplex-22.5° und 3D-komplex-15° nicht zeigte. Zudem wies der tendenzielle Anstieg von Anzeige 3D-einfach-22.5° zu Anzeige 3D-komplex-22.5° auf einen Einfluss der visuellen Komplexität hin. Die 2D-Draufsicht zeigte die kürzesten Reaktionszeiten.
- Die 2D-Seitenansicht ergab in Aufgabe 2 (Distanzschätzung Wunschabstand) signifikant genauere Distanzurteile als die 2D-Draufsicht. Vermutlich wirkte sich hier negativ aus, dass die für die Schätzung verfügbare maximale Strecke zwischen den Fahrzeugen in der 2D-Draufsicht nur 68% der Strecke in der 2D-Seitenansicht betrug.
- In der Kontrollaufgabe 4 zeigten sich wie erwartet keine Unterschiede zwischen den Anzeigen. Dies bestätigt die Validität und Reliabilität der Messmethodik.
- Die 2D-Anzeigen waren bei der Bearbeitung der Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2 und der Aufgabe 3 (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs) besser als die 3D-Anzeigen. Der Vorteil der 2D-Anzeigen war gegenüber den visuell komplexen 3D-Anzeigen deutlicher als gegenüber der visuell einfachen 3D-Anzeige.

### ***11.3.3 Ablenkungswirkung: Blickdaten und Fahrdaten***

Die Blick- und Fahrdaten wurden über die gesamte dreiminütige Versuchsfahrt und über die reine Aufgabenbearbeitungszeit ausgewertet. Über die Ergebnisse der Blickdaten informiert Abbildung 11-7 und über die Ergebnisse der Fahrdaten Abbildung 11-8.



### Abbildung 11-7: Ergebnisse Blickdaten für Experiment 4

Es sind die Blickanzahl (oben) und der Anteil der Blickdauer (unten) über die Aufgabenlösungszeit (links) und über die gesamte Zeit einer Versuchsfahrt von drei Minuten (rechts) in Abhängigkeit der Anzeigen 1 bis 5 (2D-Seitenansicht, 2D-Draufsicht, 3D-einfach-22.5°, 3D-komplex-22.5°, 3D-komplex-15°) sowie der Aufgaben 1 bis 4 (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug und Wunschabstand, Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs, Kontrollaufgabe) dargestellt. ( $N = 20$ ).

#### Blickdaten

Aufgrund von Datenaufzeichnungsfehlern und von Fehlern in der Kalibrierung mussten die Blickdaten von sechs Probanden aus der Auswertung ausgeschlossen werden, sodass 20 Datensätze in der Auswertung verblieben. Zwischen den Anzeigen gab es in keiner der Aufgaben 1 bis 4 Unterschiede in der Qualität der Blicherfassung (s. Anhang D, Tab. D-4). Die mittlere Anzahl von Blicken auf das Display betrug während der gesamten Fahrt 84.1 und während der Aufgabenbearbeitung 9.2. Während der gesamten Fahrt wurde durchschnittlich 31.2% der Zeit auf das Display geschaut, während der Aufgabenbearbeitung 52.8% der Zeit. Ein Blick dauerte im Durchschnitt 729 ms.

In **Aufgabe 1** (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug) und in **Kontrollaufgabe 4** zeigten sich keine signifikanten Effekte oder Einzelvergleiche.

**Aufgabe 2** (Distanzschätzung Wunschabstand) ergab vereinzelte signifikante Unterschiede zwischen einzelnen Anzeigen (s. Anhang D, Tab. D-6). Es können folgende Trends festgehalten werden: Auf Anzeige 1 wurden sowohl

etwas häufigere als auch etwas längere Blicke und auf Anzeige 5 zwar keine häufigeren, aber etwas längere Blicke gerichtet.

In **Aufgabe 3** (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs) zeigte sich nur in den Einzelvergleichen (s. Anhang D, Tab. D-6) ein Trend dahingehend, dass auf die 2D-Draufsicht weniger und kürzere Blicke gerichtet wurden als auf alle anderen Anzeigen. Es gab Anzeichen dafür, dass Aufgabe 3 mit Hilfe der peripheren Wahrnehmung bearbeitet wurde. Trotz seltenerer und kürzerer Blicke als in den anderen Aufgaben wurde die aufgabenrelevante Information jedoch richtig erfasst, da die Versuchspersonen sehr schnell und fast fehlerfrei reagierten.

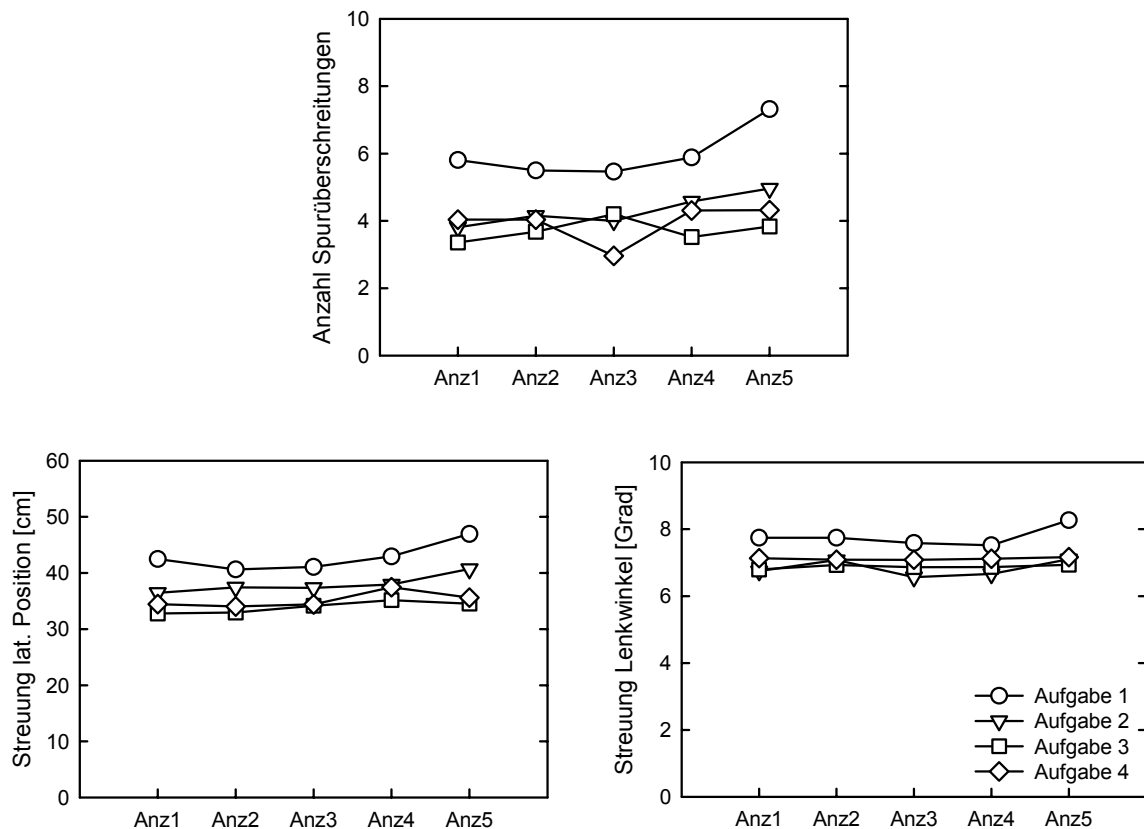
### Zusammenfassung Blickdaten

- Weder der Faktor *räumliche Kompatibilität* noch der Faktor *visuelle Komplexität* hatten insgesamt einen Einfluss auf die Blickdaten. Es ist anhand dieser Ergebnisse nicht davon auszugehen, dass durch 3D-Anzeigen das Risiko einer häufigeren und längeren Blickzuwendung zu Displayinhalten während der Fahrt erhöht wird.
- Die visuelle Ablenkungswirkung der Anzeigen des Abstandsregeltempomaten ist auch absolut gesehen nicht als kritisch zu bewerten. Ein Blick mit einer durchschnittlichen Dauer von 729 ms reichte aus, um die notwendigen Informationen für die Aufgabenbearbeitung aufzunehmen.

### Fahrdaten

Da sich in den Fahrdaten keine Unterschiede zwischen der Auswertung über die gesamte Fahrzeit und über die Aufgabenlösungszeit zeigten, werden nur die Ergebnisse zur gesamten Fahrzeit berichtet (s. Abb. 11-8). Die mittlere Streuung der lateralen Position betrug 37.5 cm, die mittlere Streuung des Lenkwinkels 7.2° und die mittlere Anzahl der Spurüberschreitungen 4.1.

In **Aufgabe 1** (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug) ergaben sich signifikante Effekte für die Streuung der lateralen Position,  $F(4, 100) = 3.60, p < .05$ ; für die Streuung des Lenkwinkels,  $F(4, 100) = 5.16, p < .001$ ; und für die Anzahl der Spurüberschreitungen,  $F(4, 100) = 3.82, p < .05$ . Diese Effekte kamen dadurch zustande, dass die Anzeige 3D-komplex-15° in der Streuung der lateralen Position eine tendenziell sowie in der Streuung des Lenkwinkels und in der Anzahl der Spurüberschreitungen eine signifikant größere Ablenkungswirkung als die Anzeige 3D-komplex-22.5° aufwies (s. Abb. 11-8).



**Abbildung 11-8: Ergebnisse Fahrdaten für Experiment 4**

Es sind die Anzahl der Spurüberschreitungen (oben), die Streuung der lateralen Position (unten links) und die Streuung des Lenkwinkels (unten rechts) über die gesamte dreiminütige Fahrzeit in Abhängigkeit der Anzeigen 1 bis 5 (2D-Seitenansicht, 2D-Draufsicht, 3D-einfach-22.5°, 3D-komplex-22.5°, 3D-komplex-15°) sowie der Aufgaben 1 bis 4 (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug und Wunschabstand, Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs, Kontrollaufgabe) dargestellt. ( $N = 26$ ).

In der Auswertung von **Aufgabe 2** (Distanzschätzung Wunschabstand) zeigte sich die größere Ablenkungswirkung der Anzeige 3D-komplex-15° weniger deutlich als in Aufgabe 1. Ein signifikanter Effekt ergab sich nur für die Streuung der lateralen Position,  $F(4, 100) = 3.20$ ,  $p < .05$ . Hier zeigte die Anzeige 3D-komplex-15° eine tendenziell größere Streuung der lateralen Position als Anzeige 3D-komplex-22.5°. Der Effekt der Streuung des Lenkwinkels verfehlte knapp das Signifikanzniveau,  $F(4, 100) = 2.61$ ,  $p = .056$ . Hier zeigten sich signifikante Unterschiede zwischen Anzeige 1 ( $M = 6.8^\circ$ ) und Anzeige 2 ( $M = 7.1^\circ$ ) sowie zwischen Anzeige 4 ( $M = 6.7^\circ$ ) und Anzeige 5 ( $M = 7.1^\circ$ ). Für die Anzahl der Spurüberschreitungen gab es keine signifikanten Ergebnisse.

Weder in **Aufgabe 3** (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs) noch in **Kontrollaufgabe 4** erbrachten die Varianzanalysen signifikante Effekte. Nur in Aufgabe 4 gab es in den Einzelvergleichen signifikant häufigere Spurüberschreitungen und größere Streuungen in der lateralen Position für Anzeige 3D-komplex-22.5° im Vergleich zu Anzeige

3D-einfach-22.5°, die im Zusammenhang mit allen anderen Ergebnissen schwer zu interpretieren sind.

### Zusammenfassung Fahrdaten

- Insgesamt muss anhand der Ergebnisse nicht davon ausgegangen werden, dass 3D-Anzeigen die Ablenkungswirkung grundsätzlich erhöhen. Die Wirkung des Faktors *räumliche Kompatibilität* beschränkte sich darauf, dass die visuell komplexe 3D-Anzeige mit 15° Höhenwinkel in den Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2 insgesamt eine größere Ablenkungswirkung zeigte als die anderen Anzeigen. Die einfache und die komplexe 3D-Anzeige mit 22.5° Höhenwinkel zeigten diesen Effekt nicht. Die Variation der *visuellen Komplexität* zeigte keinen Einfluss auf die Ablenkungswirkung.
- Die Ergebnisse anderer Simulatorexperimente belegen (Bengler et al., 2003; Bengler et al., 2004; Reed & Green, 1999; Schattenberg, 2002), dass nicht nur relativ zwischen den Anzeigen 1 bis 4, sondern auch absolut für diese Anzeigen von einer unkritischen Ablenkungswirkung ausgegangen werden kann (s. Tab. 11-3). Auch die Ergebnisse der Anzeige 3D-komplex-15° weisen keine kritische Ablenkungswirkung aus.

**Tabelle 11-3: Wertebereiche Fahrdaten in anderen Simulatorexperimenten**

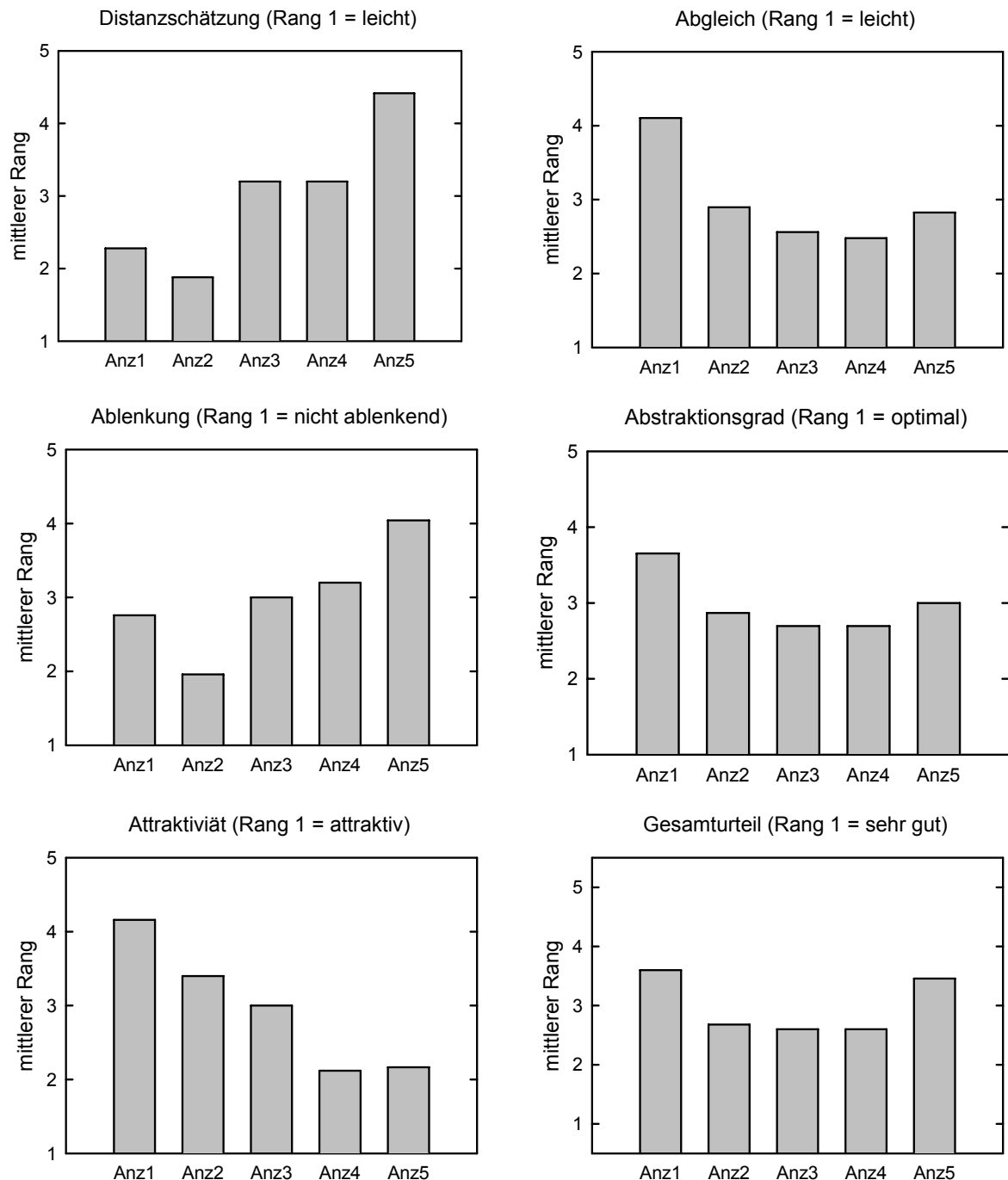
Experiment	SD laterale Position in cm		SD Lenkwinkel in Grad		Anzahl Spurüberschreitungen	
	ohne NA	mit NA	ohne NA	mit NA	ohne NA	mit NA
<b>Ergebnisse Experiment 4</b>	-	37.5	-	7.2	-	4.1
<b>Reed &amp; Green (1999) gerade Strecke</b>	36	85	4.1	8.2	-	-
<b>Schattenberg (2002) Exp. 1 gerade Strecke</b>	-	-	2.2	6.7	-	-
<b>Schattenberg (2002) Exp. 2 kurvige Strecke</b>	-	-	20.6	21.2	-	-
<b>Bengler et al. (2003, 2004) gerade Strecke, 11 NA, Fahrdauer unbekannt</b>	-	16 - 35	-	1.5 - 2.3	-	0.4-1.4
<b>Bengler et al. (2003, 2004) gerade Strecke, 11 NA, dynamischer Simulator</b>	-	-	-	2.5 - 4.1	-	-

Anmerkungen: NA = Nebenaufgabe; - Maß wurde nicht erhoben bzw. berichtet.

### **11.3.4 Subjektive Bewertung**

Die subjektive Bewertung anhand der fünfstufigen Ratingskala nach der Fahrt mit einer Anzeige ergab vergleichbare Ergebnisse wie die Rangreihen am Ende des Experiments. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Rangreihen

berichtet. Die Ergebnisse der Ratingskalen werden in Kapitel 12 für den Vergleich der subjektiven Bewertungen in Experiment 4 und 5 verwendet.



**Abbildung 11-9: Ergebnisse subjektive Bewertung für Experiment 4**

Es sind die mittleren Rangplätze für die subjektive Bewertung der Schwierigkeit der Distanzschätzung, der Schwierigkeit des Abgleichs von Anzeige und Außensicht, der Ablenkungswirkung, des optimalen Abstraktionsgrades, der Attraktivität und der Eignung der Anzeigen für eine Verwendung im Fahrzeug (von oben links nach unten rechts) für die Anzeigen 1 bis 5 (2D-Seitenansicht, 2D-Draufsicht, 3D-einfach-22.5°, 3D-komplex-22.5°, 3D-komplex-15°) dargestellt. ( $N = 25$ ).

Für alle Fragen erbrachte der Friedmann-Test signifikante Effekte. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11-9 dargestellt und die statistischen Kennwerte sind in Anhang D in Tabelle D-8 zu finden. Mit den 2D-Anzeigen waren die

Distanzen am leichtesten, mit den Anzeigen 3D-einfach-22.5° und 3D-komplex-22.5° signifikant schwerer und mit Anzeige 3D-komplex-15° am schwersten zu schätzen. Der Abgleich war im Probandenurteil nur mit der 2D-Seitenansicht signifikant schwieriger als mit allen anderen Anzeigen. Die empfundene Ablenkungswirkung war mit der 2D-Draufsicht am geringsten, mit der 2D-Seitenansicht, der Anzeige 3D-einfach-22.5° und der Anzeige 3D-komplex-22.5° vergleichbar im mittleren Bereich und mit Anzeige 3D-komplex-15° am stärksten.

Der Abstraktionsgrad der Anzeigen 2 bis 5 wurde als gleichermaßen optimal eingestuft. Nur die 2D-Seitenansicht erschien als zu abstrakt. Dieses Urteil beeinflusste möglicherweise die Bewertung der Attraktivität der Anzeigen, denn die 2D-Seitenansicht wurde von den Probanden als am wenigsten attraktiv eingestuft. Die 2D-Draufsicht und die einfache 3D-Anzeige belegten gleichauf die mittleren Rangplätze. Wie erwartet wurden die komplexen 3D-Anzeigen 4 und 5 gleichermaßen als besonders attraktiv empfunden.

#### Zusammenfassung subjektive Bewertung

- Obwohl die Distanzen mit der 2D-Seitenansicht leicht zu schätzen waren und die Ablenkungswirkung im mittleren Bereich lag, wurde diese Anzeige als schlecht bewertet, weil der Abgleich schwerer fiel, die Anzeige zu abstrakt und zu wenig attraktiv war.
- Die Anzeige 3D-komplex-15° wurde aus anderen Gründen schlecht bewertet. Sie war attraktiv, der Grad an Realismus gefiel und der Abgleich war leichter als mit der Seitenansicht. Die Distanzschätzung war schwerer und die Anzeige lenkte am stärksten ab.
- Die 2D-Draufsicht, die Anzeigen 3D-einfach-22.5° und 3D-komplex-22.5° waren in der Gesamtbewertung die Favoriten. Hier glich sich aus, dass mit der 2D-Draufsicht die Distanzen leichter zu schätzen waren und die Anzeige weniger ablenkend war als die beiden anderen, hingegen aber die Anzeige 3D-komplex-22.5° attraktiver als die 2D-Draufsicht gefunden wurde. Der Abgleich und der Realismus wurde bei allen drei Anzeigen als gut bewertet. Anzeige 3D-einfach-22.5° lag immer im Mittelfeld.

## **11.4 Diskussion**

Experiment 4 wurde durchgeführt, um abschätzen zu können, welchen Einfluss die Faktoren *räumliche Kompatibilität* und *visuelle Komplexität* auf die Wahrnehmungssicherheit, die Ablenkungswirkung und die subjektive Bewertung des Nutzens und der Attraktivität von 2D- und 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten haben. Die beiden Faktoren wurden in fünf



Anzeigen unvollständig kombiniert. Die Probanden lösten vier Wahrnehmungsaufgaben während der Fahrt mit dem ART im Simulator.

Der Kompromiss zwischen der Auflösung in der Tiefe und dem Abgleich zwischen Anzeige und Außensicht wurde zugunsten der Auflösung in der Tiefe entschieden (Gegenhypothese zu Hypothese 1 bestätigt). Wie bereits in Experiment 2 mit Hilfe einer Versuchsanordnung ohne Abgleich ermittelt, war die Leistung in den Distanzschätzungsaufgaben in Perspektiven mit geringerer Auflösung in der Tiefe schlechter als in solchen mit höherer Auflösung. So erzielte die Anzeige 3D-einfach-22.5° schlechtere Ergebnisse als die 2D-Draufsicht und die Anzeige 3D-komplex-15° schlechtere als die Anzeige 3D-komplex-22.5°. Die subjektiven Bewertungen stimmten hierbei mit den objektiven Daten überein.

Es gab keinerlei Hinweise auf eine Bestätigung der Hypothese 1, dass besonders kompatible Perspektiven den Abgleich zwischen Anzeige und Fahrzeugumgebung erleichtern und sich dadurch die Leistungen in den Distanzschätzungsaufgaben verbessern. Selbst für die beiden 2D-Anzeigen ergaben sich bei unterschiedlicher räumlicher Kompatibilität und annähernd gleicher Auflösung der Distanzinformation<sup>6</sup>, vergleichbare Leistungen in den Distanzschätzungsaufgaben. In der subjektiven Einschätzung der Probanden war der Abgleich lediglich mit der am wenigsten kompatiblen 2D-Seitenansicht schwieriger als mit allen anderen Anzeigen.

Eine Anordnung der Anzeige in Fahrtrichtung – wie in der 2D-Draufsicht – schien bei der Nutzung des Abstandsregeltempomaten für einen Abgleich mit der Außensicht vollkommen auszureichen. Dies entspricht dem Befund in der Literatur, dass Informationen oben auf einem vertikalen Display als vorn in der Realität interpretiert werden (Franklin & Tversky, 1990; McCarley & He, 2001; Norman, 2002; Shepard & Hurwitz, 1984). Genau genommen war keine der verwendeten Anzeigen vollkommen inkompatibel in einer Art und Weise, dass rechts und links oder oben und unten im Vergleich zur Anordnung in der Umgebung vertauscht waren. In derart inkompatiblen Bedingungen (z.B. die Probanden bewegten sich auf einer Norden-oben Karte in Richtung Süden) fanden Aretz (1991) und Aretz & Wickens (1992) beim Kartenabgleich besonders schlechte Leistungen. Trotz alledem war die ausbleibende Wirkung des Faktors *räumliche Kompatibilität* unerwartet, weil in Untersuchungen zum Kartenabgleich und zur mentalen Rotation robuste Effekte größerer Abwei-

---

<sup>6</sup> Obwohl die Auflösung der Distanzinformation in der 2D-Seitenansicht und in der 2D-Draufsicht maximal und unverzerrt war, stand aufgrund des querformatigen Displays in der 2D-Draufsicht eine kleinere absolute Streckenlänge (68%) zur Verfügung als in der 2D-Seitenansicht.

chungen der Höhenwinkel als  $30^\circ$  (Goldberg et al., 1992; Hickox & Wickens, 1999; Schreiber et al., 1998) und der Azimutwinkel als  $45^\circ$  (Brown & Gallimore, 1995; Hickox & Wickens, 1999; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Schreiber et al., 1998; Wickens et al., 1996; Wickens & Prevett, 1995) zuverlässig nachgewiesen wurden.

Möglicherweise muss im Nachhinein aufgrund der ausgebliebenen Effekte des Faktors *räumliche Kompatibilität* die Annahme korrigiert werden, dass im vorliegenden Versuchsaufbau bei jedem Blickwechsel wirklich ein Abgleich erforderlich war. Eventuell verschafften sich die Probanden einmalig zu Beginn der Nutzung einer Anzeigenalternative einen Eindruck über Anordnung der Informationen in der Anzeige in Relation zur Anordnung in der Realität. McCarley & He (2001) wiesen in einem Experiment zum *sequenziellen Priming* nach, dass Probanden eine Anordnung von Objekten im Raum solange als festen Bezugsrahmen aufrechterhalten, bis eine neue Anordnung gezeigt wird. Bei der Nutzung des ART gibt es weder in der Realität noch in der Anzeige Veränderungen in der Anordnung der Informationen. Das vorausfahrende Fahrzeug befindet sich immer vor dem eigenen. Sowohl in den Experimenten zum Kartenabgleich bei der Navigation (z.B. Schreiber et al., 1998) als auch in den Experimenten zur mentalen Rotation (z.B. Shepard & Metzler, 1971) änderte sich die relative Anordnung der Informationen zwischen den Abbildungen jeweils von einem Versuchsreiz zum nächsten.

Da in Experiment 4 mit einer Anzeigenalternative von einer Distanzschätzung zur nächsten offensichtlich nicht jedes Mal ein neuerlicher Abgleich erforderlich war und außerdem genaue Tiefenurteile erfasst wurden, nahm nur die Auflösung in der Tiefe Einfluss auf die Leistung in den Distanzschätzungsaufgaben. Bei welchen Aufgaben und Anzeigen im Fahrzeug ein Abgleich überhaupt erforderlich ist und sich demzufolge Vorteile einer kompatiblen 3D-Anzeige zeigen könnten, wird in der Diskussion in Kapitel 13 erläutert.

Die in Hypothese 2 erwartete negative Wirkung einer größeren visuellen Komplexität auf die Distanzschätzung (Aufgaben 1 und 2) und auf das Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs (Aufgabe 3) wurde dadurch nachgewiesen, dass die Anzeige 3D-komplex- $22.5^\circ$  trotz gleichen Höhenwinkels insgesamt schlechtere Ergebnisse erzielte als die Anzeige 3D-einfach- $22.5^\circ$ . Es bleibt offen, welcher Teil der Manipulation der visuellen Komplexität dieses Ergebnis verursachte.

In Aufgabe 3 zum Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs ergaben sich längere Reaktionszeiten für die 3D-Anzeigen als für die 2D-Anzeigen und ebenfalls längere Reaktionszeiten für die komplexen 3D-Anzeigen als für die einfache 3D-Anzeige. Die Ergebnisse werden so

interpretiert, dass die Objekterkennung durch die visuelle Suche des vorausfahrenden Fahrzeugs in den umgebenden 3D-Fahrszenen – insbesondere bei den komplexen 3D-Anzeigen – schwieriger gewesen sein muss als in den 2D-Fahrszenen. Gleichzeitig wurde aber keine auffallend größere Ablenkungswirkung in den Blick- oder Fahrdaten für die 3D-Anzeigen erfasst. Die Blickdaten zeigten aber, dass ein Lösen der Aufgabe 3 mit Hilfe der peripheren Wahrnehmung insbesondere bei der 2D-Draufsicht möglich war. Anders als in Aufgabe 3 wurde in der Kontrollaufgabe 4 das Lesen der Schriftzeile durch die benachbarten 3D-Fahrszenen nicht gestört. Wahrscheinlich wurde durch die konstante und separate Positionierung der Schrift in der linken oberen Ecke der Anzeige ein Einfluss der Fahrszenen verhindert. Im Gegensatz dazu musste in Aufgabe 3 die aufgabenrelevante Information direkt in der Fahrszene gesucht werden und veränderte zudem beständig ihre Position. Im nachfolgenden Experiment 5 wurde überprüft, ob sich der beobachtete Effekt mit autostereoskopischen 3D-Anzeigen replizieren lässt.

Weder in den Blickdaten noch in den Fahrdaten wurde insgesamt eine größere Ablenkungswirkung der komplexen gegenüber den einfachen Anzeigen bzw. eine größere Ablenkungswirkung der 3D-Anzeigen gegenüber den 2D-Anzeigen festgestellt. Dimensionalität und visuelle Komplexität hatten in den untersuchten Anzeigen keinen Einfluss auf die Ablenkungswirkung, aber es zeigte sich eine Wirkung der räumlichen Kompatibilität. In den Distanzschätzungsaufgaben, die mit der 3D-Anzeige mit 15° Höhenwinkel besonders schwierig waren, stieg auch die Ablenkungswirkung in den Fahrdaten. In den Blickdaten gab es diesen Unterschied zwar nicht, aber in der subjektiven Bewertung wurde die Anzeige 3D-komplex-15° ebenfalls als am stärksten ablenkend eingestuft (vgl. auch Experiment 3). Obwohl sich in den objektiven Daten keine geringere Ablenkungswirkung für die 2D-Draufsicht zeigte, wurde sie als am wenigsten ablenkend eingeschätzt. Als wichtiges Ergebnis ist festzuhalten, dass in diesem Experiment keine Hinweise dafür gefunden wurden, dass 3D-Anzeigen prinzipiell ablenkender wirken.

In der subjektiven Bewertung der Attraktivität zeigte sich ein positiver Einfluss der visuellen Komplexität, nicht aber der erwartete positive Einfluss der Dimensionalität (Hypothese 4). Lediglich mit den visuell komplexen 3D-Anzeigen, die einen höheren Grad an Realismus aufwiesen, wurde ein signifikanter Attraktivitätsvorteil gegenüber den 2D-Anzeigen gemessen. Der Unterschied zwischen der visuell einfachen 3D-Anzeige und der 2D-Draufsicht ging zwar in die erwartete Richtung, war aber nicht signifikant. Darüber hinaus brachte auch der Höhenwinkel von 15° keinen weiteren Attraktivitätsvorteil gegenüber der komplexen 3D-Anzeige-22.5°. Da die positive Bewertung der Attraktivität der 3D-Anzeigen somit durch den Grad an

Realismus und die graphischen Details und nicht durch die Perspektive der Darstellung verursacht wurde, bleibt zu prüfen, inwieweit eine Ergänzung der 2D-Draufsicht durch 3D-Effekte und ein realistisches 3D-Fahrzeugmodell deren Attraktivität steigern könnte.

Entgegen der Hypothese 4 fand sich in der subjektiven Bewertung der Nützlichkeit - wie in den objektiven Daten - ein Nachteil für die 3D-Anzeigen wegen der geringeren Auflösung in der Tiefe. Eine 2D-Draufsicht reichte den Probanden für die mit der Anzeige verbundenen Informationsbedürfnisse aus und erzielte die geringste Ablenkungswirkung. Es kann festgehalten werden, dass die Dreidimensionalität nicht generell als nützlicher angesehen wurde, die visuelle Komplexität keinen Einfluss auf die Bewertung der Nützlichkeit hatte und ein flacher Höhenwinkel von  $15^\circ$  als nachteilig empfunden wurde.

**Zusammenfassung:** Aus den Aufgabendaten, den Blickdaten, den Fahrdaten und der subjektiven Bewertung des Nutzens ergab sich in Experiment 4, dass die 2D-Draufsicht die sinnvollste Anzeige für den Abstandsregeltempomaten ist. Die Anordnung der Fahrzeuge in der Vertikalen reichte für einen einmaligen Abgleich mit der Außensicht zu Beginn der Nutzung einer Anzeigenalternative aus. Die Distanzschätzurteile fielen mit der 2D-Draufsicht leicht, weil eine maximale und unverzerrte Auflösung in der Tiefe vorlag. Um die Strecke zwischen den beiden Fahrzeugen zu verlängern und damit die Schätzung kleiner Distanzen weiter zu vereinfachen, könnten kleinere Fahrzeuge in der 2D-Draufsicht dargestellt oder ein hochformatiges Display verwendet werden. Zieht man weitere Faktoren in Betracht, wie beispielsweise das in Experiment 3 nachgewiesene bessere unmittelbare Verständnis der 3D-Anzeigen, die in den Experimenten 3 und 4 ermittelte größere Attraktivität von visuell komplexen 3D-Anzeigen sowie die Tatsache, dass anhand der Anzeige des Abstandsregeltempomaten normalerweise keine genauen Tiefenurteile getroffen werden müssen, können 3D-Anzeigen mit einem Höhenwinkel von mindestens  $22.5^\circ$  ebenfalls verwendet werden. Möglicherweise reicht jedoch eine Ergänzung der 2D-Draufsicht durch 3D-Effekte und ein realistisches 3D-Fahrzeugmodell aus, um die erwähnten Vorteile der 3D-Anzeigen aufzuholen. Sobald genaue Tiefenurteile wichtig sind, sollte eine 2D-Draufsicht bzw. sollten 3D-Anzeigen mit Höhenwinkeln  $> 45^\circ$  verwendet werden. Zudem muss im Einzelfall genau geprüft werden, ob lediglich ein einmaliger oder ein kontinuierlicher Abgleich erforderlich ist.

## **12 Experiment 5 – Vergleich von monoskopischen und autostereoskopischen 3D-Anzeigen im Fahrsimulator**

### **12.1 Fragestellung und Hypothesen**

Monoskopische 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten erwiesen sich sowohl für das unmittelbare Verständnis (s. Experiment 3) als auch für die Attraktivität (s. Experimente 3 und 4) als vorteilhaft. Weitere 3D-Vorteile sind vorstellbar, wenn die räumlichen Anforderungen der Aufgaben größer sind sowie wenn ein kontinuierlicher Abgleich der Anzeige mit der Außensicht erforderlich ist (z.B. Navigationskarte). In Experiment 5 soll aufbauend auf diesen Ergebnissen überprüft werden, welche Auswirkungen aktuelle fahrzeugtaugliche autostereoskopische Displays (ASD) auf die Wahrnehmungssicherheit, die Ablenkungswirkung und die subjektive Bewertung von 3D-Anzeigen haben. Es wurden dazu die komplexen 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten aus Experiment 4 verwendet.

Konkret sollte herausgefunden werden, ob der aktuelle technische Stand fahrzeugtauglicher ASD bereits die Qualität erreicht hat, dass Wahrnehmungsnachteile bei einer Verwendung der ASD während der Fahrt im Vergleich zu konventionellen Displays ausgeschlossen werden können. Es sei hier auf Experiment 1 verwiesen, in dem das dort verwendete 8-Ansichten-ASD mit Barrierenmaske um 108 ms längere Reaktionen bei vergleichbaren Fehlerraten hervorrief. Dieses ASD war in seiner Darstellungsqualität deutlich schlechter als das 2-Ansichten-ASD mit Linsenmaske, welches in Experiment 5 eingesetzt wurde. Durch die Ergebnisse der Experimente 1 und 2 konnte ausgeschlossen werden, dass die Ursache für die längeren Reaktionszeiten des ASD in der stereoskopischen Darstellung an sich begründet ist, weil die stereoskopischen Anzeigen mit Shutterbrille im Gegensatz zu den autostereoskopischen Anzeigen keine Wahrnehmungsnachteile produzierten.

Neben der Untersuchung der Wahrnehmungseffekte war fraglich, ob die Verwendung von autostereoskopischen 3D-Anzeigen während der Fahrt eine zusätzliche Ablenkung des Fahrers im Vergleich zu 2D- und monoskopischen 3D-Anzeigen bewirkt. Diese Absicherung musste durchgeführt werden, da zu befürchten war, dass der plastische 3D-Effekt auf dem ASD unnötige Blicke auf sich zieht und dadurch die Fahrleistung verschlechtert.

Zur Überprüfung der Wahrnehmungssicherheit und der Ablenkungswirkung wurden die Wahrnehmungsaufgaben aus Experiment 4 während der Fahrt mit dem Abstandsregeltempomaten im Simulator verwendet. Damit die Ergebnisse in Experiment 5 mit denen aus Experiment 4 verglichen werden konnten, wurden die komplexen 3D-Anzeigen mit 22.5° und 15° Höhenwinkel

verwendet, alle weiteren Versuchsbedingungen auf die gleiche Weise umgesetzt und die gleichen abhängigen Variablen ausgewertet.

Darüber hinaus interessierte nicht nur, ob sich durch die Darstellung der komplexen 3D-Anzeige aus Experiment 4 auf dem ASD keine zusätzlichen Nachteile in der Wahrnehmungssicherheit und in der Ablenkungswirkung ergaben, sondern ob sich durch eine autostereoskopische Darbietung nicht einzelne in Experiment 4 gefundene Nachteile ausgleichen ließen. Es wurde erwartet, dass insbesondere die Anzeige mit dem flachen Höhenwinkel  $15^\circ$  von der autostereoskopischen Darstellung profitierte, weil hier der plastische 3D-Effekt am stärksten zum Tragen kam und die Nachteile für die Distanzschätzung aufgrund der geringen Auflösung in der Tiefe in Experiment 4 am größten waren. In der Literatur gibt es Nachweise dafür, dass die stereoskopische Disparität eine geringe Auflösung in der Tiefe in ungünstigen Perspektiven kompensiert (vgl. Barfield & Rosenberg, 1995; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Yeh & Silverstein, 1992). Da dieser Effekt in Experiment 2 nicht gefunden wurde, sollte diese Fragestellung in Experiment 5 nochmals überprüft werden. Außerdem könnte eine autostereoskopische Anzeige in der Fahrerperspektive Attraktivitätsvorteile haben, weil so die natürlichen Wahrnehmungsbedingungen am exaktesten abgebildet werden. Der Höhenwinkel  $22.5^\circ$  wurde eingesetzt, weil er in Experiment 4 aufgrund der höheren Auflösung in der Tiefe bessere Ergebnisse in den Distanzschätzungsaufgaben erzielte als der Höhenwinkel  $15^\circ$  und gleichzeitig bei diesem Höhenwinkel eine stereoskopische Darstellung noch sinnvoll war. Bei größeren Höhenwinkeln als  $22.5^\circ$  unterstützt die stereoskopische Disparität nicht mehr die Tiefenwahrnehmung entlang der Sichtlinie, sondern stellt den Abstand von der relativ hohen Position der virtuellen Kamera zu den Fahrzeugen und der Straße plastisch dar.

Insgesamt wurden in den objektiven Daten keine Vorteile der autostereoskopischen gegenüber der monoskopischen Darstellung erwartet, weil in der visuell komplexen 3D-Anzeige bereits ausreichend monokulare Tiefenkriterien enthalten waren. Bei Verwendung der Tiefenkriterien Perspektive, Textur und Verdeckung wurde in Experiment 1 eine stabile Tiefenwahrnehmung nachgewiesen, die durch eine stereoskopische Darstellung nicht weiter verbessert wurde. In Experiment 2 zeigten sich insgesamt keine Vorteile einer stereoskopischen Darstellung bei der Bearbeitung einer Distanzschätzungsaufgabe mit einem ersten Entwurf einer 3D-Anzeige des ART.

Die visuell komplexen 3D-Anzeigen aus Experiment 4 wurden verwendet, weil sie ein Maximum an sinnvoller visueller Komplexität darstellen, welches für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen nicht überschritten werden sollte, und somit ein strengeres Kriterium zur Überprüfung der Wahrnehmungssicherheit und

Ablenkungswirkung von fahrzeugtauglichen ASD abgaben als die visuell einfache 3D-Anzeige aus Experiment 4. Zudem enthielten die komplexen Anzeigen durch die texturierte Straße und den texturierten Hintergrund visuelle Details, die einer Intensivierung des stereoskopischen Eindrucks dienten.

Die subjektive Bewertung der Nützlichkeit und der Attraktivität von autostereoskopischen 3D-Anzeigen wurde anhand der gleichen sechs Fragen wie in Experiment 4 anhand des Fragebogens mit der fünfstufigen Ratingskala nach der jeder Versuchsfahrt mit einer Anzeige erfasst (s. Anhang E). Aufgrund der Ergebnisse in den vorangegangenen Experimenten wurde erwartet, dass die Probanden die autostereoskopischen 3D-Anzeigen zwar als attraktiver, aber nicht als nützlicher einschätzen als die monoskopischen. Um technische Verbesserungsmöglichkeiten der ASD ableiten zu können, wurde den Probanden ein Fragebogen mit 13 Fragen zum visuellen Komfort und zur Qualität des stereoskopischen Tiefeneindrucks vorgelegt (s. Anhang E). Der Fragebogen wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt<sup>7</sup>, da zum Zeitpunkt der Untersuchung keine aussagekräftigen Verfahren in der Literatur verfügbar waren und stellt einen ersten explorativen Ansatz dar, Aspekte des visuellen Komforts und der Qualität des stereoskopischen Tiefeneindrucks in stereoskopischen Displays zu erfassen.

Im Einzelnen wurden folgende Hypothesen überprüft:

- **Hypothese 1a:** Das verwendete ASD erzeugt keine unerwünschten Wahrnehmungseffekte, sodass die Wahrnehmungsaufgaben genauso schnell und genau bearbeitet werden wie mit den monoskopischen 3D-Anzeigen in Experiment 4.
- **Hypothese 1b:** Das verwendete ASD erzeugt keine zusätzliche Ablenkungswirkung, sodass sich die Blickdaten und die Fahrdaten bei der Bearbeitung der Wahrnehmungsaufgaben nicht von denen in Experiment 4 unterscheiden.
- **Hypothese 2:** Die autostereoskopische Darstellung gleicht die in Experiment 4 mit einem konventionellen Display bei der Bearbeitung der Distanzschätzungsaufgaben gefundenen Nachteile des Höhenwinkels 15° gegenüber dem Höhenwinkel 22.5° in der Wahrnehmungssicherheit und in der Ablenkungswirkung aus.

---

<sup>7</sup> Der Fragebogen zum visuellen Komfort und zur Qualität des ASD wurde von Christopf Meyer zu Kniendorf aus der Abteilung „Akzeptanz- und Verhaltensanalyse“ und der Verfasserin dieser Arbeit im Rahmen des Forschungsprojekts „ARTIST“ der Daimler AG gemeinsam entwickelt.

- **Hypothese 3a:** Die autostereoskopische 3D-Anzeige wird gegenüber der monoskopischen zwar nicht als nützlicher, aber als attraktiver bewertet.
- **Hypothese 3b:** Mit dem ASD wird der flache Höhenwinkel  $15^\circ$  gegenüber dem größeren Höhenwinkel  $22.5^\circ$  sowohl als nützlicher als auch als attraktiver bewertet.

## 12.2 Methode

### 12.2.1 Versuchsplan

Es wurde ein zweifaktorieller varianzanalytischer Versuchsplan angewendet (s. Tab. 12-1). Der *between*-Faktor *Display* wurde zweistufig realisiert (Mono, ASD). Die Ergebnisse für die monoskopischen Anzeigen wurden aus Experiment 4 übernommen. Der *within*-Faktor *Höhenwinkel* wurde zweistufig realisiert ( $22.5^\circ$ ,  $15^\circ$ ). Die Reihenfolge der Anzeigen und Aufgabentypen wurde permutiert. Alle weiteren Details waren identisch mit Experiment 4.

**Tabelle 12-1: Versuchsplan für Experiment 5**

Display (between)	Mono 3D komplex		ASD 3D komplex	
Höhenwinkel (within)	$22.5^\circ$	$15^\circ$	$22.5^\circ$	$15^\circ$
Aufgabentyp 1	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Aufgabentyp 2	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Aufgabentyp 3	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Aufgabentyp 4	N <sub>1</sub>	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
Anzeigen Nr. in Experiment 4	4	5	4	5
Experiment Nr.	4		5	

Anmerkungen: N<sub>1</sub> und N<sub>2</sub> sind zwei unterschiedliche Stichproben.

### 12.2.2 Versuchsteilnehmer

An der Untersuchung nahmen 28 Versuchspersonen teil. Aufgrund von Simulatorkrankheit wurden vier Versuchspersonen aus den statistischen Analysen ausgeschlossen. Die verbleibenden 24 Versuchspersonen (12 Frauen, 12 Männer) hatten ein durchschnittliches Alter von 47 Jahren ( $SD = 12.0$ , 26 bis 66 Jahre). Keiner der Versuchsteilnehmer hatte zuvor an Experiment 4 teilgenommen. Bis auf sechs Personen waren alle Versuchsteilnehmer externe Mercedes-Kunden. Probandenakquise und Aufwandsentschädigung wurden wie in den Experimenten 3 und 4 gehandhabt. Mit dem Sehtestgerät aus Experiment 1 wurde sichergestellt, dass alle Versuchspersonen eine Nah- und Fernsehschärfe von mindestens 0.7 Visus sowie eine Stereosehschärfe von mindestens zwei Bogenminuten nachwiesen. 13 Probanden trugen Kontaktlinsen. Trotz eines tendenziellen Altersunterschieds zwischen den Versuchsgruppen der Experimente 4 und 5,  $Z(60) = -1.74$ ,  $p < .1$ ; gab es keine Unterschiede



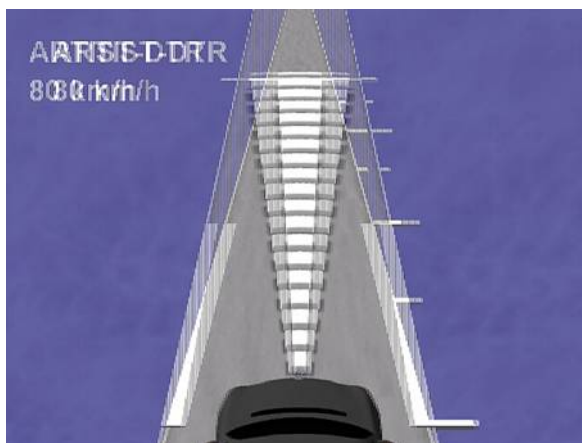
in allen anderen demographischen Daten und in den Parametern des Sehens. Die Ausprägung dieser Variablen wurde in Experiment 4 beschrieben. Die beiden Versuchsgruppen waren somit vergleichbar.

### 12.2.3 Apparatur

Das Experiment fand im Juni 2005 im Fahrsimulator der Daimler AG in Stuttgart-Untertürkheim statt. Der Versuchsaufbau, die Versuchssteuerung und die Datenaufzeichnung stimmten bis auf die folgenden Ausnahmen mit Experiment 4 überein. Das konventionelle Display im Kombiinstrument wurde durch ein ASD mit einer speziell angefertigten Linsenmaskentechnologie der Firma SeeReal ersetzt, welches ausgehend vom Basisdisplay aus den Experimenten 3 und 4 für einen Betrachtungsabstand von 80 cm optimiert war. Die Auflösung der Bilder für jedes Auge betrug 640 Pixel x 600 Pixel. Die Helligkeit des ASD wurde auf die Helligkeit des Basisdisplays in Experiment 4 abgestimmt.

### 12.2.4 Versuchsreize

Die Anzeigen des Abstandsregeltempomaten 3D-komplex-22.5° und 3D-komplex-15° aus Experiment 4 wurden auf dem ASD dargestellt (s. Abb. 12-1). Die Position der Schrift wurde so optimiert, dass sie für das linke Auge nicht zu nah am linken Rand der Anzeige war. Die mittlere Position für das rechte und linke Auge entsprach der Position der Schrift in Experiment 4. Auf dem ASD wurde die Schriftgröße 38 pt anstelle von 36 pt in Experiment 4 verwendet, da die Schrift andernfalls auf dem ASD zu schlecht erkennbar gewesen wäre. Die Stereoparameter und Disparitäten sind in Anhang E in Tabelle E-1 zu finden.



Anzeige 4: 3D-komplex-22.5° Höhenwinkel

Anzeige 5: 3D-komplex-15° Höhenwinkel

### Abbildung 12-1: Anzeigen für Experiment 5

In einer (auto)stereoskopischen Darstellung werden dem linken und dem rechten Auge unterschiedliche Ansichten dargeboten. Es sind für die Anzeige mit 22.5° (links) und 15° (rechts) Höhenwinkel die Ansichten für das linke und rechte Auge gleichzeitig in einer Abbildung dargestellt.

### 12.2.5 Durchführung und Versuchsaufgaben

Das Experiment dauerte mit jedem Probanden ca. eine Stunde und 30 Minuten. Die Durchführung und die Versuchsaufgaben entsprachen Experiment 4. Am Ende des Experiments wurde den Probanden der Fragebogen zum visuellen Komfort und zur Qualität des ASD vorgelegt (s. Anhang E).

## 12.3 Ergebnisse

Für alle abhängigen Variablen wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit dem between-Faktor *Display* und dem within-Faktor *Höhenwinkel* verwendet. Als Voraussetzung der Varianzanalyse wurde die Varianzhomogenität der unterschiedlich großen Stichproben des between-Faktors *Display* mit Hilfe des Levene-Tests überprüft (Bortz, 1993, S. 262). Wenn für eine abhängige Variable keine Varianzhomogenität gegeben war, wurde die Auswertung für den Faktor *Display* anhand von *t*-Tests für unabhängige Stichproben mit Korrektur der nicht vorhandenen Varianzhomogenität durchgeführt. Die Normalverteilungsannahme wurde in 23 von 246 Variablen nicht bestätigt. Die entsprechenden parameterfreien Verfahren erbrachten keine abweichenden Ergebnisse. In allen weiteren Fragen wurden die statistischen Analysen analog zu Experiment 1 vorgenommen und berichtet. Die statistischen Kennwerte sind in Anhang E in den Tabellen E-5 bis E-8 zu finden. Wechselwirkungen werden nur angegeben, wenn sie eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% unterschreiten. Aus den Auswertungen zu Aufgabe 4 wurde ein Proband der ASD-Bedingung ausgeschlossen, weil er die Instruktionen nicht befolgte.

Es gab keine Unterschiede in den Parametern des Versuchsszenarios zwischen den Displays bzw. den Höhenwinkeln (s. Anhang, Tab. E-2).

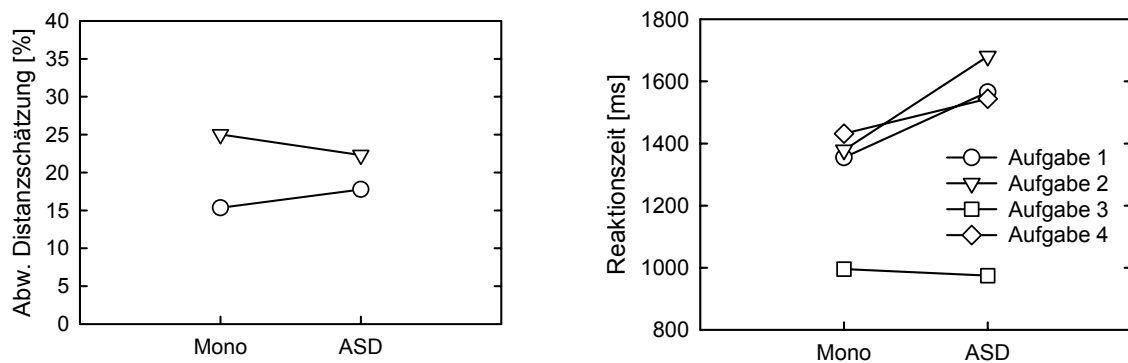
### 12.3.1 Wahrnehmungssicherheit: Abweichung der Distanzschätzung, Reaktionszeiten und Bearbeitungsfehler

#### Abweichung Distanzschätzung

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 4 verarbeitet. Einen Überblick der Ergebnisse zeigt Abbildung 12-2. Anhand der absoluten Abweichungen wurde festgestellt, dass die Probanden die Distanzen leicht überschätzten.

In **Aufgabe 1** (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug) ergab sich kein Haupteffekt des Faktors *Display*. Für den Faktor *Höhenwinkel* zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt,  $F(1, 48) = 24.79, p < .01$ . Die Distanzschätzungen waren auf dem konventionellen Display mit dem Höhenwinkel 15° um 3.9% signifikant ungenauer als mit dem Höhenwinkel 22.5°. Dieser Unterschied war mit 4.3% auf dem ASD ebenfalls signifikant.

In **Aufgabe 2** (Distanzschätzung Wunschabstand) gab es keinen Haupteffekt für den Faktor *Display*, aber für den Faktor *Höhenwinkel*,  $F(1,48) = 10.28, p < .01$ . Die Schätzung war auf dem konventionellen Display mit dem Höhenwinkel  $15^\circ$  um 4.3% signifikant ungenauer als mit dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$ . Auf dem ASD war der Unterschied von 3.2% nicht signifikant.



**Abbildung 12-2: Ergebnisse Wahrnehmungssicherheit für Experiment 5**

Die linke Abbildung informiert über die Genauigkeit der Distanzschätzung in Abhängigkeit der Displayvarianten sowie der Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2. Die Genauigkeit der Distanzschätzung wird als Betrag der Abweichung des Schätzwertes vom realen Wert angegeben. 100% entsprechen der maximal zu schätzenden Distanz. In der rechten Abbildung sind die Reaktionszeiten in Abhängigkeit der Displayvarianten sowie der Aufgaben 1 bis 4 (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug, Distanzschätzung Wunschabstand, Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs, Kontrollaufgabe) dargestellt. ( $N_{\text{Mono}}=26, N_{\text{ASD}}=24$ ).

### Reaktionszeiten

Die Rohdaten wurden wie in Experiment 4 behandelt und hatten eine ausreichend gute Qualität, um sinnvoll ausgewertet werden zu können (s. Anhang E, Tab. E-3). Die Ergebnisse sind in Abbildung 12-2 dargestellt.

In **Aufgabe 1** (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug) brauchten die Probanden über beide Höhenwinkel gemittelt mit dem ASD ( $M = 1566$  ms) 201 ms länger für die Distanzschätzung als mit dem konventionellen Display ( $M = 1365$  ms),  $t(48) = -2.20, p < .05$ . Für den Faktor *Höhenwinkel* zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt,  $F(1, 48) = 8.48, p < .01$ . Mit dem konventionellen Display zeigten sich mit dem Höhenwinkel  $15^\circ$  um 24 ms längere Reaktionszeiten als mit dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$ , wobei dieser Unterschied nicht signifikant war. Mit dem ASD vergrößerte sich dieser Unterschied auf 145 ms und war auf dem 1-% Niveau signifikant.

In den Reaktionszeiten der **Aufgabe 2** (Distanzschätzung Wunschabstand) war der Nachteil des ASD ( $M = 1681$  ms) gegenüber dem konventionellen Display ( $M = 1379$  ms) mit 302 ms sogar noch deutlicher als in Aufgabe 1,  $t(48) = -3.51, p < .01$ . Für den Faktor *Höhenwinkel* ergab sich lediglich ein tendenzieller Haupteffekt. Der signifikante Nachteil des Höhenwinkels  $15^\circ$  gegenüber dem

Höhenwinkel  $22.5^\circ$  betrug auf dem konventionellen Display 145 ms. Auf dem ASD wurde der Nachteil des Höhenwinkels  $15^\circ$  von 51 ms nicht signifikant, aber die Reaktionszeiten lagen auf dem ASD insgesamt deutlich über denen auf dem konventionellen Display.

In **Aufgabe 3** (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs) gab es keine signifikanten Effekte. Die Reaktionszeiten betrugen durchschnittlich 985 ms.

In **Kontrollaufgabe 4** wurde mit dem ASD ( $M = 1544$  ms) durchschnittlich 112 ms länger gebraucht als mit dem konventionellen Display ( $M = 1432$  ms), um die Schrift zu erfassen. Dieser praktisch recht große Unterschied erreichte aufgrund großer Streuungen weder in der Varianzanalyse noch in den Einzelvergleichen Signifikanz.

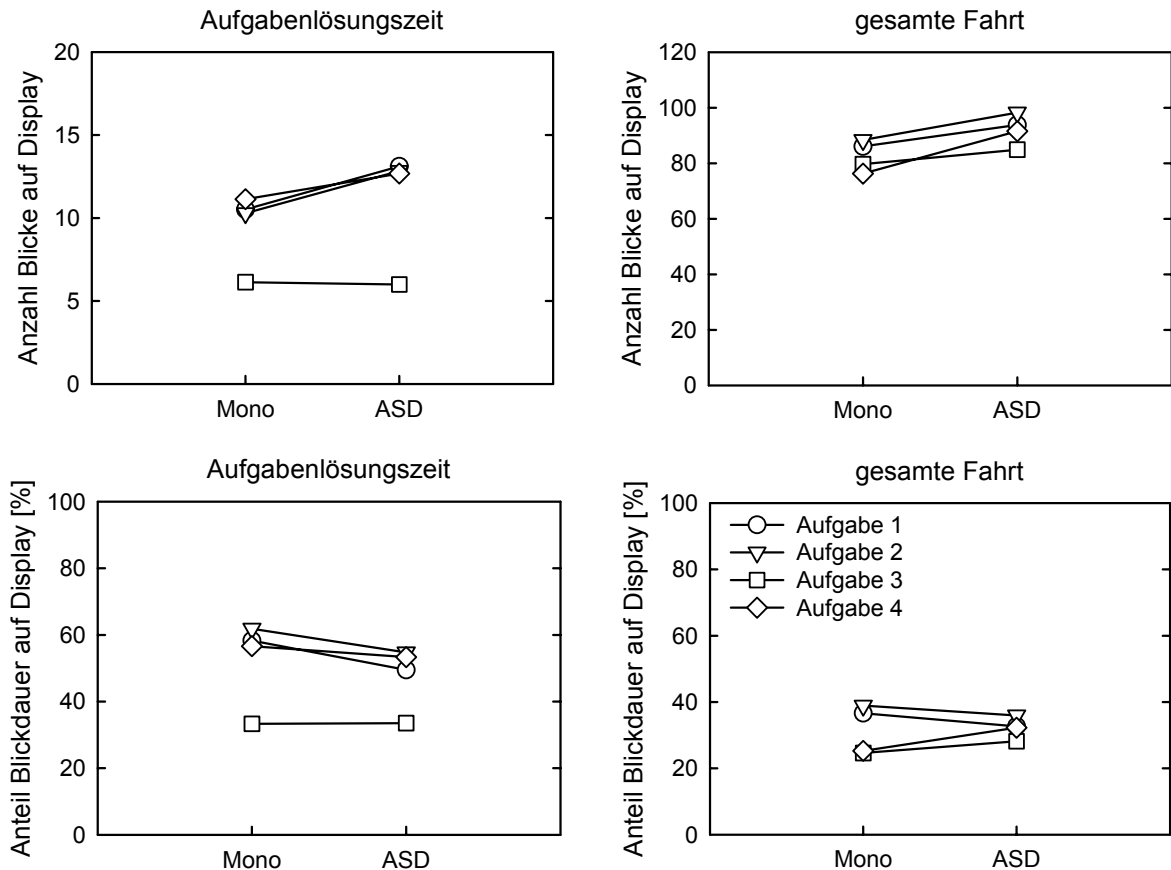
Die Bearbeitungsfehler wurden in den **Aufgaben 3 und 4** wie bereits in Experiment 4 nicht ausgewertet, weil sie zu selten vorkamen (Aufgabe 3: 1.7%, Aufgabe 4: 3.0%).

### Zusammenfassung Wahrnehmungssicherheit

- Das ASD erzeugte negative Wahrnehmungseffekte im Vergleich zum konventionellen Display. Die Reaktionszeiten waren in den Distanzschätzungsaufgaben mit dem ASD um durchschnittlich 252 ms (signifikant) und beim Lesen der Schrift um 112 ms (nicht signifikant) langsamer. Beim Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs gab es keine Unterschiede in den Reaktionszeiten. Auf die Genauigkeit der Distanzschätzung hatte das ASD keinen negativen Einfluss.
- Für die Hypothese, dass eine autostereoskopische Darstellung die Nachteile des flachen Höhenwinkels  $15^\circ$  ausgleichen könnte, gab es keine Belege. Der Nachteil des Höhenwinkels  $15^\circ$  gegenüber dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$  betrug auf dem ASD über die Aufgaben 1 und 2 gemittelt für die Reaktionszeiten 98 ms und für die Genauigkeit der Distanzschätzung eine Abweichung von 3.8%.

### **12.3.2 Ablenkungswirkung: Blickdaten und Fahrdaten**

Es wurden die gleichen abhängigen Variablen für die Auswertung der Blickdaten und Fahrdaten wie in Experiment 4 erhoben und ebenfalls sowohl über die gesamte Fahrzeit als auch über die Aufgabenlösungszeit ausgewertet. Über die Ergebnisse der Blickdaten informiert Abbildung 12-3 und über die Ergebnisse der Fahrdaten Abbildung 12-4.



**Abbildung 12-3: Ergebnisse Blickdaten für Experiment 5**

Es sind die Blickanzahl (oben) und der Anteil der Blickdauer (unten) über die Aufgabenlösungszeit (links) und über die gesamte dreiminütige Fahrzeit (rechts) in Abhängigkeit der Displayvarianten sowie der Aufgaben 1 bis 4 (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug und Wunschabstand, Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs, Kontrollaufgabe) dargestellt. ( $N_{\text{Mono}}=20$ ,  $N_{\text{ASD}}=19$ ).

### Blickdaten

Aufgrund von Datenaufzeichnungs- und Kalibrierungsfehlern mussten die Blickdaten von fünf Probanden aus der Auswertung entfernt werden. Es verblieben die Blickdaten von 19 Probanden für das ASD, die mit den Blickdaten der 20 Probanden für aus Experiment 4 verglichen wurden. Bei keiner der Aufgaben 1 bis 4 gab es signifikante Unterschiede in der Qualität der Blicherfassung zwischen den Displays bzw. zwischen den Höhenwinkeln (s. Anhang E, Tab. E-4). Während der gesamten Fahrt wurden durchschnittlich 87,4 Blicke auf das Display gerichtet, während der Aufgabenlösung waren es 10,9 Blicke. Der Anteil der Blickdauer auf das Display betrug während der gesamten Fahrt 31,1% und während der Aufgabenlösung 50,1%. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12-3 dargestellt.

In den **Aufgaben 1, 3 und 4** gab es keine Haupteffekte oder Wechselwirkungen.

In **Aufgabe 2** (Distanzschätzung Wunschabstand) erbrachten die Varianzanalysen für den Faktor *Display* lediglich einen signifikanten Haupteffekt der

Anzahl der Blicke während der Aufgabenlösung,  $F(1,37) = 7.54, p < .05$ . Es wurden auf das ASD ( $M = 14.4$ ) 4.1 mehr Blicke gerichtet als auf das konventionelle Display ( $M = 10.3$ ). Im Gegensatz dazu zeigte sich in der Blickdauer während der Aufgabenlösung mit dem Höhenwinkel  $15^\circ$  ein signifikanter Vorteil für das ASD, der mit  $22.5^\circ$  aber nicht zu finden war. Dieser Unterschied zwischen den Höhenwinkeln führte zu einer signifikanten Wechselwirkung,  $F(1, 37) = 5.59, p < .05$ . Der Faktor *Höhenwinkel* ergab keine Haupteffekte.

### Diskussion Besonderheiten Blickdaten

Aufgrund der deutlich längeren Reaktionszeiten in der ASD-Bedingung für die Aufgaben 1, 2 und 4 war zumindest für die Auswertung über die Aufgabenlösungszeit ein signifikanter Nachteil des ASD in den Blickdaten erwartet worden. Es bleibt offen, wie sich die Inkonsistenz zwischen Reaktionszeiten und Blickdaten erklären lässt. Die Qualität der Blicherfassung unterschied sich weder zwischen den Höhenwinkeln noch zwischen den Experimenten 4 und 5 und außerdem zeigte der Vergleich der Durchschnittswerte der Aufgaben 1 bis 4 und der Vergleich der Ergebnisse für die gesamte Fahrzeit und für die Aufgabenlösungszeit die erwarteten Unterschiede.

### Zusammenfassung Blickdaten

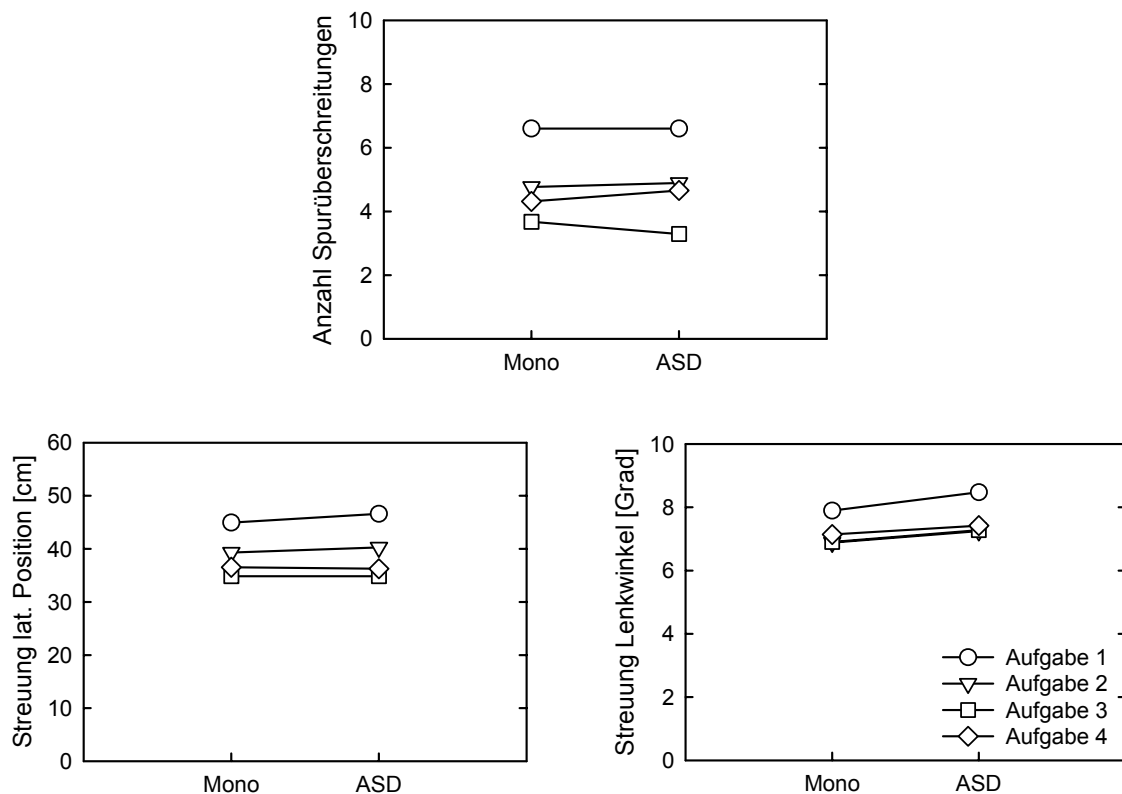
- Keine der Displayvarianten zog insgesamt häufigere und längere Blicke auf sich. In allen vier Aufgaben waren die Unterschiede zwischen den Displays nur einmal signifikant. Trotzdem zeigten die Graphen für die Variablen Blickanzahl und Blickdauer in den Aufgaben 1, 2 und 4 genau entgegengesetzt gerichtete Verläufe. Auf das ASD wurden häufigere, aber kürzere Blicke gerichtet als auf das konventionelle Display.
- Zwischen den Höhenwinkeln gab es mit dem ASD keine Unterschiede in den Blickdaten der Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2, auf dem konventionellen Display in Experiment 4 hingegen schon.

### Fahrdaten

Da sich in den Fahrdaten keine wesentlichen Unterschiede zwischen der Auswertung über die gesamte Fahrzeit und über die Aufgabenlösungszeit zeigten, werden stellvertretend nur die Ergebnisse der gesamten Fahrzeit berichtet. Die mittlere Streuung des Lenkwinkels betrug  $7.4^\circ$ , die mittlere Streuung der lateralen Position 39.2 cm und die mittlere Anzahl der Spurüberschreitungen 4.9. Die Ergebnisse sind in Abbildung 12-4 dargestellt.

In **Aufgabe 1** (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug) war die Streuung des Lenkwinkels für das ASD ( $M = 8.5^\circ$ ) um  $0.6^\circ$  größer als für das konventionelle Display ( $M = 7.9^\circ$ ),  $t(48) = -2.89, p < .01$ . Für den Höhenwinkel  $22.5^\circ$

war der Unterschied von  $0.9^\circ$  signifikant. Für den Höhenwinkel  $15^\circ$  war die Streuung des Lenkwinkels bereits auf dem konventionellen Display um  $0.8^\circ$  größer als für den Höhenwinkel  $22.5^\circ$  und verschlechterte sich auf dem ASD nur noch minimal. Es zeigten sich keine Haupteffekte für die beiden anderen Ablenkungsindikatoren. Der Faktor *Höhenwinkel* erbrachte signifikante Haupteffekte für die Streuung der lateralen Position,  $F(1, 48) = 4.23, p < .05$ ; und für die Streuung des Lenkwinkels,  $F(1, 48) = 4.87, p < .05$ . Für diese Effekte waren die in Experiment 4 gefundenen Nachteile des Höhenwinkels  $15^\circ$  gegenüber  $22.5^\circ$  auf dem konventionellen Display verantwortlich. Die minimalen Nachteile des Höhenwinkels  $15^\circ$  gegenüber  $22.5^\circ$  waren auf dem ASD nicht signifikant. Auf dem ASD entsprachen die Ergebnisse nahezu den Ergebnissen des Höhenwinkels  $15^\circ$  auf dem konventionellen Display.



**Abbildung 12-4: Ergebnisse Fahrdaten für Experiment 5**

Es sind die Anzahl der Spurüberschreitungen (oben), die Streuung der lateralen Position (unten links) und die Streuung des Lenkwinkels (unten rechts) über die dreiminütige Fahrzeit in Abhängigkeit der Displayvarianten sowie der Aufgaben 1 bis 4 (Distanzschätzung vorausfahrendes Fahrzeug und Wunschabstand, Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs, Kontrollaufgabe) dargestellt. ( $N_{\text{Mono}}=26, N_{\text{ASD}}=24$ ).

In **Aufgabe 2** (Distanzschätzung Wunschabstand) zeigte sich für den Faktor *Display* ein tendenzieller Haupteffekt für die Streuung des Lenkwinkels,  $F(1, 48) = 3.62, p = .063$ . Diese war mit dem ASD ( $M = 7.3^\circ$ ) insgesamt um  $0.4^\circ$  größer als mit dem konventionellen Display ( $M = 6.9^\circ$ ). Wie in Aufgabe 1 gab es einen signifikanten Unterschied von  $0.7^\circ$  zwischen den Displays nur für den Höhenwinkel  $22.5^\circ$ . Es ergab sich deshalb eine signifikante Wechselwir-

kung für die Streuung des Lenkwinkels,  $F(1, 48) = 4.55, p < .05$ . Der Faktor *Höhenwinkel* erbrachte keine Haupteffekte. Die in Experiment 4 beschriebenen Nachteile des Höhenwinkels  $15^\circ$  gegenüber  $22.5^\circ$  zeigten sich nur auf dem konventionellen Display. Auf dem ASD entsprachen die Ergebnisse – wie schon in Aufgabe 1 – nahezu den Ergebnissen des Höhenwinkels  $15^\circ$  auf dem konventionellen Display.

In **Aufgabe 3** (Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs) erbrachte die Streuung des Lenkwinkels einen signifikanten Haupteffekt des Faktors *Display*,  $F(1, 47) = 4.60, p < .05$ . Die Streuung des Lenkwinkels war für das ASD ( $M = 7.3^\circ$ ) um  $0.4^\circ$  größer als für das konventionelle Display ( $M = 6.9^\circ$ ). Wie in den Aufgaben 1 und 2 wurde der Unterschied von  $0.6^\circ$  für den Höhenwinkel  $22.5^\circ$  tendenziell signifikant, für den Höhenwinkel  $15^\circ$  gab es keinen.

In **Aufgabe 4** ergab der Faktor *Display* einen signifikanten Haupteffekt für die Streuung des Lenkwinkels,  $F(1, 48) = 4.08, p < .05$ . Mit dem ASD ( $M = 7.4^\circ$ ) war die Streuung des Lenkwinkels um  $0.3^\circ$  (sig.) größer als auf dem konventionellen Display ( $M = 7.1^\circ$ ). Für die Höhenwinkel  $22.5^\circ$  und  $15^\circ$  zeigten die Unterschiede in die gleiche Richtung, wurden aber nicht signifikant.

### Zusammenfassung Fahrdaten

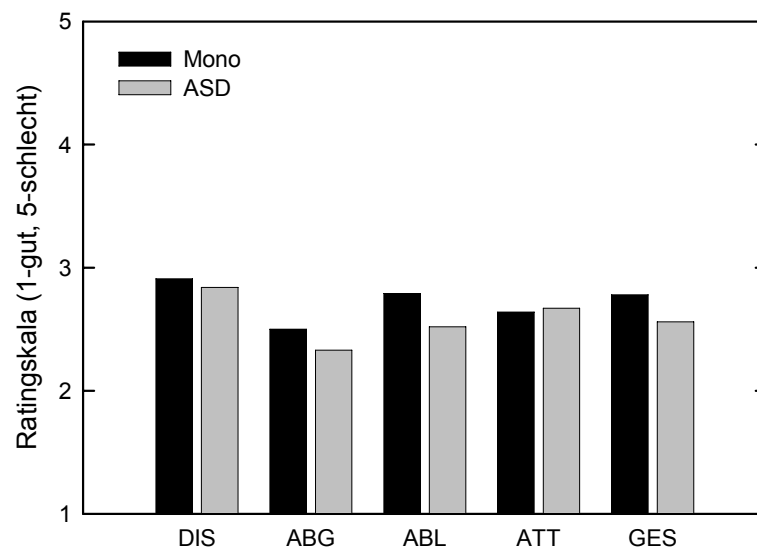
- Für den Höhenwinkel  $22.5^\circ$  war die autostereoskopische 3D-Anzeige insgesamt ablenkender als die monoskopische. Signifikante Unterschiede gab es dabei jedoch lediglich in der Streuung des Lenkwinkels. In der lateralen Position und in der Anzahl der Spurüberschreitungen zeigten sich nur in einigen Fällen kleine Unterschiede, die in die gleiche Richtung zeigten wie die Ergebnisse der Streuung des Lenkwinkels.
- Die auf dem konventionellen Display ohnehin schon etwas größere Ablenkungswirkung der 3D-Anzeige mit  $15^\circ$  Höhenwinkel in den Distanzschätzungsaufgaben 1 und 2 wurde durch das ASD nicht weiter verstärkt, aber auch nicht kompensiert, wie ursprünglich angenommen. Da die Ablenkungswirkung der Anzeige mit dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$  auf dem ASD im Vergleich zum konventionellen Display stärker war, gab es auf dem ASD keine Unterschiede zwischen den Höhenwinkeln.

### **12.3.3 Subjektive Bewertung**

Nach jeder Anzeige wurde den Versuchspersonen ein Fragebogen zur subjektiven Bewertung der Anzeigen vorgelegt (vgl. Ratingskala in Experiment 4). Über die Ergebnisse informiert Abbildung 12-5. Die statistischen Kennwerte sind in Anhang E in Tabelle E-8 zu finden. In keiner Frage zur subjektiven Bewertung der Nützlichkeit (Schwierigkeit Distanzschätzung,



Ableich mit der Außensicht, sinnvolle Perspektive, Ablenkungswirkung) gab es über beide Höhenwinkel gemittelt oder für jeden Höhenwinkel einzeln einen signifikanten Unterschied zwischen den Displays. Insgesamt wurden die autostereoskopischen Anzeigen wie erwartet nicht nützlicher als die monoskopischen bewertet. Entgegen der Erwartung wurde das ASD aber auch nicht als attraktiver eingestuft. Im Gesamturteil gab es für den Höhenwinkel  $15^\circ$  einzeln betrachtet eine tendenzielle Bevorzugung des ASD, wohingegen es für den Höhenwinkel  $22.5^\circ$  oder über beide Höhenwinkel gemittelt, insgesamt keinen Unterschied zwischen den Displays gab. Insgesamt profitierte der Höhenwinkel  $15^\circ$  von der autostereoskopischen Darstellung dahingehend, dass er nicht mehr wie in Experiment 4 durchgängig schlechter als der Höhenwinkel  $22.5^\circ$  bewertet wurde. Auf dem ASD gab es zwischen den Höhenwinkeln keine Unterschiede. Nur in der Frage zur Schwierigkeit der Distanzschätzung wurde der Höhenwinkel  $15^\circ$  auch auf dem ASD signifikant schlechter bewertet.



### Abbildung 12-5: Ergebnisse subjektive Bewertung für Experiment 5

Es sind die subjektiven Bewertungen der Schwierigkeit der Distanzschätzung (DIS), der Schwierigkeit des Abgleichs mit der Sicht aus dem Fahrzeug (ABG), der Ablenkungswirkung (ABL), der Attraktivität (ATT) und der Eignung der Anzeigen für eine Verwendung im Fahrzeug (GES) für das konventionelle Display und für das ASD abgebildet. ( $N_{\text{Mono}} = 26$ ,  $N_{\text{ASD}} = 24$ ).

Zusätzlich wurde den Probanden nach jeder Anzeige ein Fragebogen zur Bewertung des visuellen Komforts und der Qualität des ASD vorgelegt. Alle Fragen wurden sehr positiv beantwortet, sodass die Ergebnisse im Widerspruch zu den berichteten negativen Wahrnehmungseffekten standen. Die Anzeigen auf dem ASD waren im Urteil der Probanden eher nicht beanspruchend, eher angenehm, der Bewegungsbereich des Kopfes (*Eyebox*) war ausreichend groß, das Ruckeln beim Verlassen der Eyebox kaum zu spüren, der 3D-Eindruck leicht aufrecht zu erhalten, Doppelbilder kaum vorhanden, die Schrift sehr gut

lesbar, die Auflösung sehr gut. Es gab auch keine einheitlichen Verbesserungsvorschläge in den freien Kommentaren. Es wurde demzufolge einerseits festgehalten, dass der negative Effekt, den das ASD auf die Reaktionszeiten in den Wahrnehmungsaufgaben 1, 2 und 4 hatte, den Probanden entweder selbst nicht unangenehm aufgefallen war oder zumindest von ihnen nicht explizit geäußert wurde.

## 12.4 Diskussion

In Experiment 5 wurde eine autostereoskopische 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten hinsichtlich der Wahrnehmungssicherheit, der Ablenkungswirkung und der subjektiven Bewertung untersucht und mit den Ergebnissen der 3D-Anzeigen auf einem konventionellen Display aus Experiment 4 verglichen.

Das verwendete ASD stellte den derzeit bestmöglichen technischen Stand fahrzeugtauglicher autostereoskopischer Displays dar. Aber auch dieses sehr gute ASD zeigte negative Effekte auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit bei vergleichbarer Qualität der Distanzurteile entlang der Sichtlinie. In den Distanzschätzungsaufgaben wurden mit dem ASD durchschnittlich 252 ms (sig.) und beim Lesen von Schrift 112 ms (nicht sig.) langsamere Reaktionen beobachtet. Lediglich die Geschwindigkeit des Erkennens von größeren Objekten (d.h. des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs) wurde durch das ASD nicht negativ beeinflusst. Obwohl in Experiment 5 ein ASD mit deutlich besserer Bildqualität als in Experiment 1 verwendet wurde, war der Nachteil des ASD in den Reaktionszeiten in Experiment 5 größer als in Experiment 1. Dort waren sie mit dem ASD um 108 ms langsamer als mit dem konventionellen Display bei vergleichbaren Fehlerraten im Schätzen der Tiefenordnung. Der größere Reaktionszeitnachteil des ASD in Experiment 5 als in Experiment 1 lässt sich eventuell darauf zurückführen, dass es durch den Blickwechsel von der Außensicht auf das Display bei gleichzeitiger Fahraufgabe im Gegensatz zu Experiment 1 ohne Fahraufgabe möglicherweise doch eine stereoskopische Latenz gab, auch wenn diese in Experiment 1 nicht eindeutig belegt wurde. Eventuell fiel der Nachteil des ASD in Experiment 5 auch deshalb größer aus, weil die Aufgaben in Experiment 5 schwieriger waren als das Schätzen der Tiefenordnung in Experiment 1 und weil die gleichzeitige Fahrzeugführung Leistungsdefizite stärker zum Vorschein brachte.

Beim Erkennen des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs (Aufgabe 3) waren die Reaktionszeiten mit dem ASD vergleichbar mit denen in Experiment 4. Der nachteilige Effekt der umgebenden 3D-Fahrszene auf die Geschwindigkeit der Objekterkennung des vorausfahrenden Fahrzeugs bzw. dessen Verschwinden war damit auf dem ASD genau so stark ausgeprägt wie auf dem konventionellen Display.

In den Blickdaten fanden sich keine eindeutigen Vor- oder Nachteile für eine der Displayvarianten. Bei nur einem signifikanten Unterschied in allen vier Aufgaben wurden auf das ASD tendenziell häufigere, aber kürzere Blicke gerichtet als auf das konventionelle Display. In den Fahrdaten zeigten sich in der Streuung des Lenkwinkels Nachteile des ASD für die Anzeige mit dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$ . Für den Höhenwinkel  $15^\circ$  wurde die in der monoskopischen Darstellung ohnehin schon größere Ablenkungswirkung gegenüber dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$  durch das ASD nicht weiter verstärkt, aber auch nicht kompensiert, wie in Hypothese 2 erwartet. Die unterschiedliche Wirkung des ASD ist eventuell auch darauf zurückzuführen, dass sich zwischen den Anzeigen 4 und 5 nicht nur die Höhenwinkel, sondern auch die Stereoparameter unterschieden. Die Stereoparameter wurden auf die jeweilige Perspektive angepasst und stellten in der Anzeige mit  $22.5^\circ$  Höhenwinkel etwas weniger Tiefe dar als in der Anzeige mit  $15^\circ$  Höhenwinkel. Mit zunehmendem Höhenwinkel verteilt sich die stereoskopische Disparität auf die Dimensionen Tiefe und Höhe und dadurch nehmen die Stereo-Vorteile für Tiefenurteile ab.

Mit dem Höhenwinkel  $15^\circ$  wurden sowohl mit den monoskopischen als auch mit den autostereoskopischen Anzeigen langsamere Reaktionszeiten und schlechtere Distanzurteile in den Distanzschätzungsaufgaben gemessen als mit dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$ . Während die Blickdauer über die gesamte Fahrzeit und über die Aufgabenlösungszeit auf dem konventionellen Display beim Höhenwinkel  $15^\circ$  noch signifikant länger war als beim Höhenwinkel  $22.5^\circ$ , gab es diesen Unterschied auf dem ASD nicht. In den Fahrdaten zeigte sich ebenfalls eine Angleichung der Ergebnisse für die beiden Höhenwinkel auf dem ASD. Diese entstand dadurch, dass sich die Ablenkungswirkung der Anzeige mit dem Höhenwinkel  $22.5^\circ$  auf dem ASD erhöhte und nicht, wie erwartet, mit dem Höhenwinkel  $15^\circ$  sank. Insgesamt musste die Hypothese verworfen werden, dass das ASD die in Experiment 4 für den Höhenwinkel  $15^\circ$  gefundenen Nachteile hätte ausgleichen können.

In der subjektiven Bewertung war die autostereoskopische 3D-Anzeige nicht - wie in Hypothese 3a erwartet - nützlicher als die monoskopische. Dieses Ergebnis stimmt mit den objektiven Daten überein. Entgegen der Hypothese 3a und der Ergebnisse in Experiment 2 war die 3D-Anzeige auf dem ASD aber auch nicht attraktiver als auf dem konventionellen Display. Möglicherweise haben die Fahraufgabe und das kleine Display dazu geführt, dass der fehlende subjektive Nutzen der Anzeige auch auf die Bewertung der Attraktivität ausstrahlte. Der Höhenwinkel  $15^\circ$  profitierte von der autostereoskopischen Darstellung dahingehend, dass er außer in der Schwierigkeit der Distanzschätzung nicht schlechter als der Höhenwinkel  $22.5^\circ$  bewertet wurde, wie dies bei den monoskopischen 3D-Anzeigen in Experiment 4 der Fall gewesen war. Die

Hypothese 3b, dass der Höhenwinkel  $15^\circ$  für eine autostereoskopische 3D-Anzeige besser geeignet wäre, wurde nicht bestätigt.

**Zusammenfassung.** Beim derzeitigen Stand der Technik muss von der Verwendung eines ASD in Fahrzeugen abgeraten werden, da es eine langsamere Informationsaufnahme und Fahrleistungen auf dem Niveau der schlechtesten Anzeige auf dem konventionellen Display provoziert. Die genauen Ursachen der Wahrnehmungs- und Ablenkungsnachteile müssen identifiziert werden, um die Qualität der ASD so zu verbessern, dass sie die von stereoskopischen Darstellungen mit Shutterbrille erreichen. Die den objektiven Daten widersprechenden positiven subjektiven Bewertungen der Qualität des ASD gaben keine Anhaltspunkte für sinnvolle Verbesserungen. Aus Expertensicht bestehen die Nachteile des verwendeten 2-Ansichten-ASD mit Linsenmaske in der Halbierung der Auflösung, im eingeschränkten Bewegungsbereich des Kopfes von ca. 6 cm, in der Optimierung der autostereoskopischen Darstellung auf einen festen Augenabstand von 80 cm, der nicht für alle Fahrer passend ist, und in den ungünstigen Farb-, Helligkeits- und Blendungseffekten. Da weder in den objektiven (s. Experimente 1, 2, 4 und 5) noch in den subjektiven Daten (s. Experiment 5) Hinweise auf mögliche Vorteile einer verbesserten (auto)stereoskopischen Darstellung gegenüber einer monoskopischen 3D-Anzeige sichtbar wurden, bleibt fraglich, ob die Entwicklung von ASD für den Einsatz in Fahrzeugen weiter vorangetrieben werden sollte. Andere Anwendungen als eine autostereoskopische 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten müssten einen deutlichen Akzeptanzvorteil beim Kunden hervorrufen, um deren Einsatz in Fahrzeugen zu rechtfertigen. Wird ein verbessertes ASD dennoch eingesetzt, sollte der Höhenwinkel der Anzeige größer als  $15^\circ$  sein, damit Tiefenurteile nicht unnötig erschwert werden. Auch wenn der nahezu egozentrische Höhenwinkel  $15^\circ$  zunächst als am besten geeignet für eine Darstellung auf dem ASD erschien, überwogen - wie auf dem konventionellen Display - dessen Nachteile.

## 13 Allgemeine Diskussion und Ausblick

Der erfolgreiche Einsatz von 3D-Anzeigen in zahlreichen Anwendungsgebieten (z.B. Konstruktion, Simulation, Computerspiele) sowie die Entwicklung autostereoskopischer Displays (ASD) führten zu der Annahme, dass 3D-Anzeigen einen positiven Beitrag für eine Optimierung der Gebrauchstauglichkeit und Attraktivität der Fahrer-Fahrzeug-Schnittstelle leisten können. Das Ziel dieser Arbeit bestand deshalb in der Herleitung und empirischen Überprüfung nutzbringender Anwendungsmöglichkeiten für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen. Dabei wurden monoskopische 3D-Anzeigen mit monokularen Tiefenkriterien auf konventionellen Displays und (auto)stereoskopische 3D-Anzeigen mit einem plastischen 3D-Effekt betrachtet. Der Schwerpunkt wurde auf 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme gelegt, da ein wesentlicher 3D-Vorteil in der Möglichkeit einer kompatiblen Darstellung der Informationen über die Fahrzeugumgebung aus der Fahrerperspektive gesehen wurde.

Im theoretischen Teil wurden in der Literatur verfügbare Befunde zu Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen erläutert. Die Ergebnisse zu erwiesenen 3D-Vorteilen wurden zu den Kategorien Integration, räumliche Kompatibilität, Aufmerksamkeitslenkung, Bildhaftigkeit und Attraktivität zusammengefasst. Für den erwarteten 3D-Vorteil „Visualisierung von Relationen“ fanden sich in der Literatur keine empirischen Nachweise. Als mögliche 3D-Nachteile wurden die Folgenden identifiziert: Probleme mit präzisen räumlichen Urteilen, Probleme bei einer Fokussierung der Aufmerksamkeit auf eine Dimension, die Ablenkungswirkung, Orientierungsprobleme im Raum, Schwierigkeiten bei der Ausführung einer freien und kontinuierlichen Navigation im Raum, fehlende Erfahrungen im Umgang mit 3D-Anwendungen bei „Normalnutzern“, der Gestaltungsaufwand sowie die Notwendigkeit des Einsatzes leistungsfähiger Hard- und Software. Verfügbare Befunde zur räumlichen Tiefenwahrnehmung und zur Gestaltung von 3D-Anzeigen wurden auf eine Anwendung im Fahrzeugkontext hin ausgewertet und im Überblick dargestellt. Aus der Literaturanalyse und aus den Ergebnissen der Experimente 1 und 2 wurden Gestaltungshinweise für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen abgeleitet und auf die Gestaltung einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten angewendet.

Zur Ableitung von Hypothesen zum Nutzen von 3D-Anzeigen wurde ein spezielles Vorgehen der Aufgabenanalyse vorgeschlagen, welches in jedem Einsatzgebiet von 3D-Anzeigen angewendet werden kann. Darin wird für jede Teilaufgabe mit Hilfe eines Fragenkatalogs zu den erwiesenen Vor- und Nachteilen von 3D-Anzeigen überprüft, inwieweit die Bearbeitung der Teilaufgabe davon profitieren kann, dass Informationen dreidimensional abgebildet werden. Als Beispielaufgabe, mit deren Hilfe eine Übertragung der

Ergebnisse dieser Arbeit auf die Anzeigen anderer Fahrerassistenzsysteme und Funktionen im Fahrzeug gewährleistet sein sollte, wurde eine 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten gewählt. Hier wurden 3D-Vorteile hinsichtlich eines einfacheren Abgleichs der Anzeige mit der Außensicht des Fahrers (Vorteil räumliche Kompatibilität), in einer Erhöhung des unmittelbaren Verständnisses der Anzeigeninhalte (Vorteil Bildhaftigkeit), in einer zusätzlichen Dimension zur Hervorhebung von Informationen (Vorteil Aufmerksamkeitslenkung) sowie in einer höheren Akzeptanz bei den Kunden (Vorteil Attraktivität) gesehen. Aus Aufwandsgründen wurde der 3D-Vorteil der Aufmerksamkeitslenkung für die Anzeige des ART in dieser Arbeit nicht untersucht. Der wichtigste 3D-Nachteil, den es für eine Verwendung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen zu überprüfen galt, war deren potenziell höhere Ablenkungswirkung.

In empirischen Teil wurden in insgesamt fünf Experimenten ausgewählte Gestaltungsoptionen, der objektive und subjektive Nutzen sowie die Grenzen von 3D-Anzeigen bezüglich der Wahrnehmungssicherheit und der Ablenkungswirkung untersucht.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dieser Arbeit zusammenfassend diskutiert und in Bezug auf deren Anwendung in anderen Nutzungskontexten erläutert. Über diese Arbeit hinausgehende weiterführende Fragestellungen werden herausgestellt.

*1. Die Vorteile von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen liegen in einer Verbesserung des unmittelbaren Verständnisses und in einer Erhöhung der Attraktivität.*

**Bildhaftigkeit.** Mit einer 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten wurden signifikant mehr Fragen zur Funktionalität des Systems, der Bedeutung der Elemente der Anzeige und der Bedeutung spezieller Veränderungen richtig bzw. teilweise richtig beantwortet als mit einer gegenwärtig in Serienfahrzeugen verbauten 2D-Anzeige (s. Experiment 3). Der subjektive Eindruck der Versuchsteilnehmer zur Verständlichkeit der Anzeigen stimmte mit diesem Ergebnis überein. Da es sich in Experiment 3 um einen Prototypenvergleich handelte, konnten keine Aussagen darüber gemacht werden, welcher Teil der Variation der Bildhaftigkeit den Vorteil der 3D-Anzeige im unmittelbaren Verständnis verursachte. War es die Wahl der Objekte und deren Anordnung (3D: Fahrzeuge, Straße und Sensorkegel vs. 2D: Fahrzeugsymbol und Linien), die perspektivische Darstellung (3D-Perspektive vs. 2D-Seitenansicht) oder der Grad an Realismus (detaillierte 3D-Modelle der Fahrzeuge, Helligkeitsverläufe, Texturen, Schatten)? Um dies herauszufinden, müssen weiterführende Untersuchungen mit einer systematischen Variation der genannten Faktoren durchgeführt werden. Dies ist auch deswegen notwendig, weil Studien zur Icongestaltung (Kebeck et al., 1997; McDougall et al., 1999; McDougall et al.,

2000; Schramek, 2003) nachweisen, dass verständliche bildhafte Darstellungen auch mit 2D-Anzeigen umgesetzt werden können.

Über die Anzeigen des Abstandsregeltempomaten hinaus, dürften die Anzeigen komplexer Funktionen wie beispielsweise Sitz-, Fahrzeug-, Licht-, Klima- und Klangeinstellungen, Hybridantrieb und Offroadfunktionen, welche mit Hilfe von Begriffen oder abstrakten Icons nur schwer zu vermitteln sind, von der Wirkung der Bildhaftigkeit als „graphischer Erläuterung“ profitieren. Dabei wird eine Ergänzung konventioneller 2D-Menükonzepte durch einzelne visuelle Metaphern - für ausgewählte Funktionen wie beispielsweise die oben genannten - als sinnvolle Gestaltungsoption angesehen, wenn es darum geht, bildhafte Darstellungen auf Multifunktionsdisplays nutzbringend einzusetzen. Der Einsatz realweltlicher Metaphern zur Visualisierung abstrakter Interaktionskonzepte wie die Menü- und Listenauswahl sowie die alphanumerische Eingabe wird hier nicht empfohlen, da entsprechend der in der Literatur berichteten Erfahrungen mit ersten Prototypen und kommerziellen Anwendungen sich keine Vorteile abzeichnen (Cockburn, 2004; Cockburn & McKenzie, 2001, 2002). 3D-Effekte (z.B. Helligkeitsverläufe, Lichtkanten, Schatten, Texturen) in der Darstellung von Icons, Menü- und Listeneinträgen, Meldungsfenstern und Eingabefeldern können jedoch zur Verbesserung der Objektwahrnehmung sowie der Erinnerung an Objekte eingesetzt werden (vgl. Ark et al., 1998; Irani & Ware, 2003; Liter et al., 1998). Bildhafte Darstellungen von landmarks und points of interest (POI) dürften den Abgleich von Navigationskarte und Realität erleichtern (vgl. Oulasvirta et al., 2005; vgl. Rakkolainen & Vainio, 2001; Vainio & Kotala, 2002).

Insgesamt kann von einem allgemeinen Vorteil bildhafter Anzeigen in Fahrzeugen und in anderen Nutzungskontexten ausgegangen werden. Weiterführende Untersuchungen sollten dahingehend durchgeführt werden, die besonderen Vorteile bildhafter 3D- im Vergleich zu bildhaften 2D-Anzeigen herauszuarbeiten.

**Attraktivität.** Die 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten erzielte in einer Felduntersuchung im normalen Straßenverkehr insgesamt eine höhere Akzeptanz als eine gegenwärtig in Serienfahrzeugen verbaute 2D-Anzeige (s. Experiment 3). Die Ursachen der höheren Akzeptanz lagen in einer positiveren Bewertung der Ästhetik/Attraktivität, der Funktionalität und der Qualität der 3D-Anzeige. In einer weiteren Felduntersuchung zum Vergleich von 2D- und 3D-Anzeigen der Einparkhilfe wurde ebenfalls ein Akzeptanzvorteil von 3D-Anzeigen nachgewiesen<sup>8</sup>. Mit graphisch vergleichbaren 2D- und

---

<sup>8</sup> Aufgrund der vergleichbaren Ergebnisse wurde auf eine ausführliche Darstellung dieser Untersuchung im empirischen Teil dieser Arbeit verzichtet.

3D-Anzeigen (z.B. Farbe, Größe, Platzierung) wurde in einem Fahrsimulator-experiment lediglich mit den visuell komplexen 3D-Anzeigen, die einen höheren Grad an Realismus aufwiesen (z.B. detailliertes Fahrzeugmodell, Texturen, Schatten, Helligkeitsverläufe), ein signifikanter Attraktivitätsvorteil gegenüber den 2D-Anzeigen gemessen (s. Experiment 4). Die weniger realistische visuell einfache 3D-Anzeige war nicht signifikant attraktiver als die 2D-Draufsicht. Da die positive Bewertung der 3D-Anzeigen somit durch den Grad an Realismus und die graphischen Details der Anzeige und nicht durch die Perspektive der Darstellung verursacht wurde, bleibt zu prüfen, inwieweit eine Ergänzung einer 2D-Draufsicht durch 3D-Effekte und realistische 3D-Modelle deren Attraktivität steigern könnte.

Autostereoskopische 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten wurden entgegen den Hypothesen nicht als attraktiver eingeschätzt als monoskopische auf einem konventionellen Display (s. Experiment 5). Dieses Ergebnis kam zustande, obwohl die Versuchsteilnehmer die Darstellungsqualität des ASD in allen Aspekten sehr positiv beurteilten. In Übereinstimmung mit den Ergebnissen des Experiments 5 wurde in einer weiteren Felduntersuchung mit dem gleichen ASD keine Akzeptanzsteigerung gegenüber der monoskopischen 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten erzielt<sup>9</sup>. Auch andere Anzeigeninhalte (3D-Kombiinstrument, kamerabasierte 3D-Navigation, 3D-Navigation mit Satellitenbildern) wurden in dieser Untersuchung auf dem ASD nicht positiver bewertet als die Anzeigen des Abstandsregeltempomaten. Zudem gab es wegen der an sich positiven Bewertung der Darstellungsqualität des verwendeten ASD keine Anhaltspunkte dafür, dass sich bei einer technischen Weiterentwicklung des ASD ein Attraktivitätsvorteil einstellen würde.

Insgesamt versprechen realitätsnahe 3D-Anzeigen in Fahrzeugen einen robusten Attraktivitäts- und dadurch Akzeptanzvorteil. Dieses Ergebnis befindet sich im Einklang mit Studien in anderen Anwendungsgebieten (z.B. Agarawala & Balakrishnan, 2006; z.B. Carswell et al., 1991; Cockburn & McKenzie, 2001; Smallman et al., 2000). Eine zusätzliche (auto)stereoskopische Darbietung lässt speziell in Fahrzeugen keine darüber hinausgehenden Vorteile erkennen. Dennoch sind in anderen Anwendungsgebieten Attraktivitäts- und Akzeptanzvorteile durch stereoskopische Anzeigen vorstellbar, sobald größere Displays mit optimaler Darstellungsqualität eingesetzt werden und die Nutzungsbedingungen eine kontinuierliche

---

<sup>9</sup> Diese Untersuchung wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „ARTIST“ von Christoph Meyer zu Kniendorf durchgeführt und wurde deshalb nicht innerhalb dieser Arbeit ausführlich berichtet.



Betrachtung des Displays zulassen (vgl. Ergebnisse der Experimente 1 und 2 sowie Hutarew et al., 2004; McWorther et al., 1991; Steiner & Dotson, 1990).

*2. Der erwartete Vorteil kompatibler 3D-Anzeigen aus der Fahrerperspektive stellte sich mit den 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten nicht ein.*

**Räumliche Kompatibilität.** In einer systematischen Untersuchung des Kompromisses zwischen der räumlichen Kompatibilität und der Auflösung in der Tiefe, welcher bei der Wahl der Perspektive in 3D-Anzeigen eingegangen werden muss, wurden entgegen den Hypothesen keinerlei Hinweise auf Leistungsvorteile durch eine zur Fahrersicht kompatible Perspektive gefunden (Experiment 4). Im Gegenteil, je kompatibler die Perspektive und damit je geringer die Auflösung in der Tiefe, desto fehlerhafter und langsamer wurden zwei verschiedene Distanzschätzungsaufgaben mit der Anzeige des Abstandsregeltempomaten gelöst. Diese Ergebnisse entsprachen den Ergebnissen des Experiments 2, in welchem eine Distanzschätzungsaufgabe an einem PC bearbeitet wurde, ohne dass ein Abgleich zwischen zwei Informationsquellen notwendig war. Aufgrund der übereinstimmenden Ergebnisse in den Experimenten 2 und 4 wurde davon ausgegangen, dass in Experiment 4 überhaupt kein Kompatibilitätseffekt wirkte. Da sich Kompatibilitätsvorteile in den Experimenten zum navigational checking (z.B. Goldberg et al., 1992; Hickox & Wickens, 1999; Schreiber et al., 1998) und zur mentalen Rotation (z.B. Barfield et al., 1988; Shepard & Hurwitz, 1984; Shepard & Metzler, 1971) zuverlässig zeigen, wird im Nachhinein die Annahme korrigiert, dass bei der Bearbeitung der Wahrnehmungsaufgaben mit den Anzeigen des Abstandsregeltempomaten bei jedem Blickwechsel tatsächlich ein Abgleich zwischen Außensicht und Anzeige erfolgt. Wie in der Diskussion des Experiments 4 ausführlich erläutert, wurde offensichtlich aufgrund der unveränderlichen Anordnung des eigenen und des vorausfahrenden Fahrzeugs in der Außensicht und in der Anzeige ein stabiler Bezugsrahmen aufgebaut, dessen Aktualisierung nach jedem Blickwechsel überflüssig war (vgl. McCarley & He, 2001). Da zudem genaue Tiefenurteile erfasst wurden, nahm ausschließlich die Auflösung in der Tiefe einen negativen Einfluss auf die Leistung in den Distanzschätzungsaufgaben.

Die Ergebnisse des Experiments 4 können auf alle Fahrerassistenzsysteme mit einer konstanten Anordnung der Informationen in der Fahrzeugumgebung wie z.B. Einparkhilfe, Nachtsichthilfe, Spurführungsassistent, Spurwechselassistent und Kollisionswarner verallgemeinert werden. Sobald kein kontinuierlicher Abgleich erforderlich ist, reicht eine in Fahrtrichtung angeordnete 2D-Draufsicht vollkommen aus, um die räumliche Kompatibilität sicherzustellen. Diese Empfehlung befindet sich im Einklang mit den Ergebnissen anderer

Studien (Franklin & Tversky, 1990; McCarley & He, 2001; Norman, 2002; Shepard & Hurwitz, 1984). Zwischen der 2D-Draufsicht und den 3D-Anzeigen gab es auch keine signifikanten Unterschiede in der subjektiven Bewertung der Schwierigkeit des Abgleichs.

Auch wenn es mit den einfachen Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen wie dem Abstandsregeltempomaten keine Anforderung eines kontinuierlichen Abgleichs zwischen Außensicht und Anzeige gibt, so ist dies hingegen bei der Nutzung des Navigationssystems zu erwarten. Speziell beim Widererkennen der eigenen Position in einer Karte bzw. eines in einer Karte dargestellten Abbiegepunktes in der Realität dürfte ein kontinuierlicher Abgleich gegeben sein (vgl. Studien zum navigational checking bei der Flugzeugführung: Goldberg et al., 1992; Hickox & Wickens, 1999; Schreiber et al., 1998). Deshalb dürfte eine permanente Ausrichtung der Navigationskarte in Fahrtrichtung den Abgleich und damit die Navigationsaufgabe erleichtern (vgl. Aretz, 1991; Aretz & Wickens, 1992; Goldberg et al., 1992; Gugerty & Brooks, 2004; Levine, 1982; Schreiber et al., 1998). Für eine Angleichung des Höhenwinkels der Kartendarstellung an die Fahrerperspektive (vgl. Eley, 1988; vgl. Goldberg et al., 1992; Hickox & Wickens, 1999; McCormick et al., 1998; Schreiber et al., 1998) sind in Verbindung mit einer 3D-Darstellung von Gebäuden, landmarks und points of interest (POI) (vgl. Oulasvirta et al., 2005; Rakkolainen & Vainio, 2001; Vainio & Kotala, 2002) ebenfalls Kompatibilitätsvorteile zu erwarten. Inwieweit die perspektivische Darstellung der konventionellen Karte (z.B. „Vogelperspektive“ in aktuellen Navigationsgeräten) bzw. eine dazu ergänzende 3D-Darstellung von Objekten in der Karte tatsächlich objektive Vorteile bei der Nutzung von Navigationssystemen in Fahrzeugen erbringt, wurde bisher noch nicht empirisch untersucht. Hier besteht ein Handlungsfeld.

Sobald die Bedienung komplexer räumlicher Funktionen wie z.B. Sitz-, Klima-, Licht-, Klang- und Fahrzeugeinstellungen durch bildhafte 3D-Anzeigen unterstützt werden, dürfte ebenfalls ein Abgleich zwischen Realität, Anzeige und Bedienung erforderlich und somit positive Kompatibilitätseffekte bei einer Verwendung von 3D-Anzeigen zu erwarten sein.

### *3. Die 3D-Anzeigen des Abstandsregeltempomaten führten zu keiner Erhöhung der Ablenkungswirkung.*

**Ablenkungswirkung.** Weder in den Blickdaten noch in den Fahrdaten der Simulatorexperimente 4 und 5 zeigte sich ein Einfluss der Dimensionalität, der visuellen Komplexität oder der monoskopischen versus autostereoskopischen Darbietung auf die Ablenkungswirkung. Deshalb ist anhand dieser Ergebnisse mit den Anzeigen des Abstandsregeltempomaten nicht davon auszugehen, dass

monoskopische oder autostereoskopische 3D-Anzeigen grundsätzlich das Risiko einer häufigeren und längeren Blickzuwendung zu Displayinhalten während der Fahrt und einer Verschlechterung der Fahrleistung zur Folge haben. Ausschließlich für die visuell komplexe 3D-Anzeige mit dem flachen Höhenwinkel  $15^\circ$  zeigte sich in den Fahrdaten bei der Bearbeitung der Distanzschätzungsaufgaben eine höhere Ablenkungswirkung als für alle anderen Anzeigen. Dies stimmte mit dem subjektiven Eindruck der Probanden überein, die in den Experimenten 3 und 4 die 3D-Anzeige mit dem Höhenwinkel  $15^\circ$  als signifikant ablenkender bewerteten als alle anderen Anzeigen. Darüber hinaus zeigte sich in den Fahrdaten des Experiments 5 eine höhere Ablenkungswirkung für die autostereoskopische gegenüber der monoskopischen 3D-Anzeige mit  $22.5^\circ$  Höhenwinkel. Da es sich hierbei um erste Experimente zur Überprüfung der Ablenkungswirkung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen handelt, sind weiterführende Untersuchungen mit anderen Anzeigen und Aufgaben erforderlich, um gesicherte Aussagen treffen zu können.

*4. Mit 3D-Anzeigen in Fahrzeugen sind keine negativen Auswirkungen auf die Wahrnehmungssicherheit zu erwarten, wenn diese hinsichtlich der Perspektive, der visuellen Komplexität, der Art und Menge der bildhaften monokularen Tiefenkriterien und der Verwendung visueller Hilfsmittel optimal umgesetzt sind. Beim derzeitigen Stand der Technik autostereoskopischer Displays sollten in Fahrzeugen nur monoskopische 3D-Anzeigen zum Einsatz kommen.*

**Perspektive.** Wenn eine Aufgabe keinen Abgleich von Außensicht und Anzeige erfordert, gilt es die Perspektive der 3D-Anzeige dahingehend zu optimieren, dass die Informationen der Dimension(en), die am wichtigsten für die Ausführung der Aufgabe ist/sind, mit größtmöglicher Auflösung dargestellt werden. Im Fahrzeugkontext sind dies die horizontalen Informationen der Breite und Tiefe. Experiment 2 zeigte, dass Tiefenurteile umso leichter fallen, je größer der Höhenwinkel ist. Ab Höhenwinkeln von  $45^\circ$  ergaben sich aber nur noch kleine Leistungssteigerungen (vgl. auch Barfield, Rosenberg et al., 1995; Smallman et al., 2002; Yeh & Silverstein, 1992). Außerdem erlauben Höhenwinkel größer  $45^\circ$  eine bessere Übersicht über eine größere Menge an Informationen (z.B. bei der Planung einer zu fahrenden Route) und eine Vorausschau auf zukünftige Ereignisse (z.B. beim Vergewissern über den Routenverlauf und die nächsten Abbiegemanöver). Der im Vergleich zur Fahrerperspektive leicht vergrößerte Höhenwinkel von  $13^\circ$  ergab in Experiment 2 sehr ungenaue und langsame Tiefenurteile. In Experiment 4 wurden die Nachteile eines Höhenwinkels von  $15^\circ$  für die Tiefenwahrnehmung repliziert. Darüber hinaus zeigten andere Autoren, dass mit 3D-Anzeigen in der Fahrerperspektive die Erkennung von Objektmerkmalen in der Tiefe schwieri-

ger als mit einer 2D-Draufsicht ist (Green & Williams, 1992; Heller et al., 2003). Eine Azimutrotation von  $45^\circ$  erhöhte in Experiment 2 in den Bedingungen mit den flachen Höhenwinkeln  $13^\circ$  und  $22.5^\circ$  die Auflösung in der Tiefe dergestalt, dass sich die Tiefenurteile verbesserten. In einem Vorexperiment zu Experiment 3 wurden während der Fahrt jedoch sogar minimale Abweichungen des Azimutwinkels der 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten von der Fahrtrichtung als derart störend und unangenehm empfunden, dass Azimutrotationen für 3D-Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen generell verworfen wurden. Die verwendeten Distanzsegmente waren in der Lage, die Nachteile der flachen Höhenwinkel  $15^\circ$  und  $22.5^\circ$  auszugleichen (s. visuelle Hilfsmittel).

Grundsätzlich ist die Wahl der Perspektive von den Anforderungen der Aufgabe abhängig und ergibt sich als Kompromiss der Gestaltungsparameter Bezugsrahmen/räumliche Kompatibilität, Auflösung der Informationen und Übersicht/Vorausschau. Deshalb kann keine für alle 3D-Anzeigen gleichermaßen geeignete Perspektive empfohlen werden. Eine Nachbildung der Fahrerperspektive hat sich hinsichtlich der räumlichen Kompatibilität als nicht notwendig und hinsichtlich der Auflösung in der Tiefe und der Übersicht als ungeeignet erwiesen.

**Visuelle Komplexität.** Eine realitätsnahe visuell komplexe 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten erbrachte signifikant schlechtere Distanzurteile und tendenziell langsamere Reaktionen beim Erkennen des Verschwindens eines vorausfahrenden Fahrzeugs in einer umgebenden Fahrszene als eine visuell einfache 3D-Anzeige mit identischem Höhenwinkel (s. Experiment 4). Dieses Ergebnis entspricht den empirischen Befunden, dass visuell komplexe Versuchsreize mit längeren visuellen Suchzeiten verbunden sind (z.B. Mazur & Reising, 1990; McDougall et al., 2000; McDougall et al., 2006). Die visuelle Komplexität wurde in Experiment 4 über die verwendeten bildhaften monokularen Tiefenkriterien (bei visuell komplex zusätzlich Helligkeitsverläufe, Texturen, Schatten), den Detaillierungsgrad der 3D-Objekte und den Einsatz von Distanzsegmenten als visuelle Hilfsmittel variiert. Die Einbußen in der Wahrnehmungssicherheit visuell komplexer 3D-Anzeigen führten aber - anders als in der Literatur berichtet (z.B. Evans & Stevens, 1997; Theofanou, 2002) - weder in den Blickdaten noch in den Fahrdaten zu einer größeren Ablenkungswirkung während der Fahrt. Dennoch gilt es, den Kompromiss zwischen Attraktivität und visueller Komplexität für den konkreten Anwendungsfall im Vorfeld bei der Gestaltung abzuschätzen und anschließend empirisch zu verifizieren. In Einsatzgebieten mit weniger restriktiven Anforderungen als im Fahrzeugkontext dürfte die Attraktivität der Anzeigen stärker im Vordergrund stehen als die Reduktion der visuellen Komplexität.

**Monokulare Tiefenkriterien.** Bereits wenige monokulare Tiefenkriterien wie die lineare Perspektive, relative Größe und Höhe und Verdeckung, die zudem technisch einfach umzusetzen sind, reichten in Experiment 1 aus, um eine stabile Tiefenwahrnehmung herzustellen. Dieses Ergebnis entspricht zahlreichen empirischen Befunden in der Literatur (z.B. Alm et al., 2003; Kim, Ellis et al., 1987; Mazur & Reising, 1990). Je mehr dieser Tiefenkriterien in den Anzeigen zum Einsatz kamen, desto schneller und fehlerfreier war die Tiefenwahrnehmung. Die Steigerung zeigte sich von der relativen Höhe und Größe über die perspektivische Darstellung einer Ebene und Wand bis hin zur Verdeckung. Nur die Textur ergab keine Verbesserung in der Tiefenwahrnehmung. Dieses Ergebnis war auf das konkrete Schachbrettmuster und nicht auf Texturen allgemein zurückzuführen (Thomas et al., 2002; Wickens et al., 1989) und zeigt, wie wichtig eine wohlüberlegte Auswahl der monokularen Tiefenkriterien und deren sorgfältige Umsetzung in den Anzeigen ist. Zudem gibt es empirische Belege dafür, dass sich bei der Verwendung von mehr als zwei Tiefenkriterien keine weiteren Verbesserungen in der Tiefenwahrnehmung einstellen (Alm et al., 2003; Kim, Ellis et al., 1987; Mazur & Reising, 1990). In Experiment 1 zeigte sich hingegen eine Verbesserung der Geschwindigkeit und Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung von der Bedingung mit den wenigsten bis hin zu der Bedingung mit den meisten Tiefenkriterien.

**Visuelle Hilfsmittel.** Die Distanzsegmente hatten in der 3D-Anzeige des Abstandsregeltempomaten in Abhängigkeit des Höhenwinkels und der monoskopischen oder stereoskopischen Darbietung Einfluss auf die Ausführung der Distanzurteile (s. Experiment 2). Die Vorteile in der Genauigkeit der Distanzschätzung (nicht aber in deren Geschwindigkeit) legen insgesamt eine Verwendung visueller Hilfsmittel in monoskopischen 3D-Anzeigen mit kleinen Höhenwinkeln ( $13^\circ$  und  $22.5^\circ$ ) nahe. In höheren Perspektiven hatten die Distanzsegmente keinen speziellen Nutzen, sodass ihre Verwendung von anderen Faktoren abhängig gemacht werden kann. Da die Distanzsegmente die Tiefenwahrnehmung in keiner Bedingung verschlechterten, kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass sie die visuelle Komplexität der Anzeige nicht negativ beeinflussen bzw. andere negative Wahrnehmungseffekte provozieren. Die Ergebnisse stützen die existierenden Befunde in der Literatur (z.B. Barfield & Rosenberg, 1995; Kim, Ellis et al., 1987; Park & Woldstad, 2000) und unterstreichen die allgemein positive Wirkung visueller Hilfsmittel, egal ob sie in 3D-Anzeigen in Fahrzeugen oder in anderen Anwendungsgebieten eingesetzt werden.

**Autostereoskopische Displays (ASD).** Obwohl das in Experiment 5 im Simulatorfahrzeug verwendete ASD den gegenwärtig bestmöglichen technischen Stand fahrzeugtauglicher autostereoskopischer Displays repräsentierte,

fanden sich negative Effekte auf die Wahrnehmungsgeschwindigkeit bei vergleichbarer Qualität der Distanzurteile entlang der Sichtlinie. In den Distanzschätzungsaufgaben wurden mit dem ASD ca. 250 ms (signifikant) und beim Lesen von Schrift ca. 110 ms (nicht signifikant) langsamere Reaktionen beobachtet. Lediglich die Geschwindigkeit des Erkennens von größeren Objekten (d.h. des Verschwindens des vorausfahrenden Fahrzeugs in der Anzeige) wurde durch das ASD nicht negativ beeinflusst. Die langsameren Wahrnehmungsgeschwindigkeiten hatten aber zumindest keine negativen Auswirkungen auf die Ablenkung während der Fahrt im Fahr Simulator, gemessen mit Hilfe von Blick- und Fahrdaten.

Aufgrund dieses Ergebnisses muss beim derzeitigen Stand der Technik vom Einsatz autostereoskopischer Displays in Fahrzeugen abgeraten werden. Da insgesamt weder ein objektiver Nutzen (auto)stereoskopischer 3D-Anzeigen in Fahrzeugen aufgrund einer ausreichenden Anzahl monokularer Tiefenkriterien zu erwarten ist (s. Experimente 1 und 2), noch die subjektiven Einschätzungen der Versuchsteilnehmer Hinweise darauf geben, dass in der Darstellungsqualität verbesserte ASD Attraktivitätsvorteile im Fahrzeug haben könnten (s. Experiment 5), sind derzeit keine Gründe dafür erkennbar, ASD für den Einsatz in Fahrzeugen technisch weiterzuentwickeln. In Einsatzgebieten mit anderen Anforderungen kann die Bewertung des objektiven Nutzens und der Attraktivität von ASD vollkommen anders ausfallen. Als Beispiele seien hier Anwendungen zu Trainings- Bildungs- und Unterhaltungszwecken erwähnt, in denen größere Displays kontinuierlich betrachtet werden.

*5. Der Nutzen stereoskopischer gegenüber monoskopischen 3D-Anzeigen ist auf spezifische Einsatzbedingungen begrenzt.*

**Stereoskopische Disparität.** Sobald in 3D-Anzeigen einige wenige monokulare Tiefenkriterien enthalten sind wie z.B. lineare Perspektive, relative Größe und relative Höhe, ist kein Vorteil der Verwendung der stereoskopischen Disparität für die Geschwindigkeit und Genauigkeit der Tiefenwahrnehmung festzustellen. In Experiment 1 zeigte sich nur in der Bedingung, in welcher die Tiefendifferenz zwischen zwei im Raum schwebenden Quadern ausschließlich anhand von Unterschieden in der relativen Höhe und Größe erkennbar war, eine schnellere Tiefenwahrnehmung mit der stereoskopischen Anzeige mit Shutterbrille. Wurde diese Darstellung durch eine perspektivisch dargestellte Ebene und Wand ergänzt, verschwand der Stereo-Vorteil. In Experiment 2 zeigten sich minimale Stereo-Vorteile in der Abweichung der Distanzschätzung (aber nicht in den Reaktionszeiten), wenn keine Distanzsegmente als visuelle Hilfsmittel angeboten wurden. Diese Ergebnisse der Experimente 1 und 2 stimmen mit den Befunden in der Literatur überein, dass sich Stereo-Vorteile nur in 3D-Anzeigen mit wenigen oder uneindeutigen monokularen Tiefenkrite-

rien sowie wenigen Objekten oder visuellen Hilfsmitteln, an denen die Tiefenkriterien wirken können, finden lassen (z.B. Grossman & Balakrishnan, 2006; Kim, Ellis et al., 1987; Ware & Franck, 1996).

Bei kleinen Abständen zeigte sich in Experiment 1 kein Stereo-Vorteil, obwohl dieser aufgrund der Ergebnisse von Yeh & Silverstein (1992) und der Tatsache, dass mit der stereoskopischen Disparität sehr kleine Tiefenunterschiede aufgelöst werden können, erwartet wurde.

Darüber hinaus reduzierte die stereoskopische Disparität nicht wie erwartet die Nachteile flacher Höhenwinkel hinsichtlich ihrer geringen Auflösung in der Tiefe. Weder im Laborexperiment 2 noch im Fahrsimulatorexperiment 5 wurde dieser aus der Literatur bekannte Effekt (Barfield & Rosenberg, 1995; Kim, Ellis et al., 1987; Kim, Tendick et al., 1987; Yeh & Silverstein, 1992) repliziert.

Für die stereoskopische Latenz fanden sich in Experiment 1 keine eindeutigen Nachweise. Möglicherweise können die deutlich längeren Reaktionszeiten mit dem ASD in Experiment 5 durch eine stereoskopische Latenz erklärt werden, was aufgrund der gewählten Versuchsanordnung jedoch nicht zu verifizieren war. Weiterführende Untersuchungen zur stereoskopischen Latenz sollten bei einer Ausführung von Doppelaufgaben durchgeführt werden, um zur Klärung dieser Frage beizutragen.

Da in bildhaften 3D-Anzeigen in Fahrzeugen zumindest die monokularen Tiefenkriterien lineare Perspektive, relative Größe und relative Höhe enthalten sind, die Verwendung visueller Hilfsmittel wahrscheinlich ist und keine minimalen Tiefenunterschiede differenziert werden müssen, ist insgesamt kein objektiver Nutzen stereoskopischer 3D-Anzeigen in Fahrzeugen zu erwarten. Darauf hat auch die Art der technischen Umsetzung der stereoskopischen Anzeigen keinen Einfluss. Durch die Verwendung hochwertiger stereoskopischer Anzeigen wie z.B. Shutter- und Polarisationsbrillen entstehen aber auch keine Nachteile für die Tiefenwahrnehmung. Bei Weiterentwicklung autostereoskopischer Displays werden auch diese in Zukunft keine negativen Wahrnehmungseffekte mehr produzieren. Stereoskopische Anzeigen bedeuten lediglich zusätzlichen technischen Aufwand.

*6. Ausgehend von den verfügbaren Befunden in der Literatur können Prognosen zum Nutzen und zu den Grenzen der in dieser Arbeit nicht untersuchten 3D-Vorteile Aufmerksamkeitslenkung und Integration abgegeben werden.*

**Aufmerksamkeitslenkung.** Es ist davon auszugehen, dass sich die Dimension der Tiefe in 3D-Anzeigen dazu eignet, ausgewählte bzw. aktive (z.B. Menüs, Listeneinträge) oder wichtige Informationen (z.B. Warnmeldungen) dadurch hervorzuheben, dass sie näher zum Betrachter hin dargestellt werden als alle

anderen Informationen. Wenn die hervorzuhebenden Informationen sich graphisch nur wenig vom Hintergrund unterscheiden, der Hintergrund ausgeblendet und die Lesbarkeit (z.B. durch Helligkeitsveränderungen) nicht beeinträchtigt werden sollen, kann eine Kodierung durch die stereoskopische Disparität insbesondere in Kombination mit einer Farbkodierung sinnvoll sein (Chau & Yeh, 1995; Nakayama & Silverman, 1986; Theeuwes et al., 1998). Ob dies eine Verwendung technisch aufwändiger ASD rechtfertigt, steht auf anderem Papier geschrieben.

**Integration.** Die Ergebnisse der Literaturanalyse lassen den Schluss zu, dass bei der Ausführung von integrativen Aufgaben – egal in welchem Anwendungsgebiet – der 3D-Vorteil der Integration wirksam ist (z.B. Haskell & Wickens, 1993; St. John, Cowen et al., 2001; Wickens & Preveet, 1995). Integrative Aufgaben zeichnen sich dadurch aus, dass Informationen der drei räumlichen Dimensionen bzw. von drei und mehr abstrakten Variablen im Zusammenhang verarbeitet werden. Der Fahrer hat nur einzelne ausgewählte Aufgaben, in denen räumliche Informationen integriert verarbeitet werden. Ein räumliches Verständnis kann beispielsweise zur Orientierung in bergigen Gegenden, für die Verortung von Warn- und Wartungsinformationen oder für eine vergleichende Betrachtung von drei und mehr abstrakten Fahrdatenvariablen im Bordcomputer hilfreich sein. Räumliche Bedienhandlungen können beim An- und Entkoppeln von Zusatzgeräten an Nutzfahrzeuge oder bei der Bedienung komplexer Komfortfunktionen wie Sitz-, Klang-, Licht- und Luftverteilungseinstellungen erforderlich werden. Sobald präzise räumliche Urteile und Bedienhandlungen vorgenommen werden, erschwert die Verkürzung entlang der Sichtlinie und die daraus folgende Mehrdeutigkeit von 3D-Anzeigen die Aufgabenbearbeitung (z.B. Alexander & Wickens, 2003; St. John, Cowen et al., 2001). Außerdem erweisen sich Veränderungen in allen Dimensionen einer integrierten Anzeige als störend, wenn eine Teilaufgabe die Fokussierung der Aufmerksamkeit auf eine Dimension erfordert (vgl. Wickens & Carswell, 1995).

*7. Für den vermuteten Vorteil von 3D-Visualisierungen komplexer Relationen wurden bisher keine empirischen Hinweise, sondern gegenteilige Befunde berichtet.*

**Visualisierung von Relationen.** Visualisierungen der Ergebnisse von Recherchen in umfangreichen Datenbanken als 3D-Netzwerkstrukturen sind im Vergleich zu inhaltlich identischen 2D-Darstellungen und zu rein textbasierten Programmen nicht in der Lage, die Informationssuche zu beschleunigen oder übersichtlicher zu gestalten (Risden et al., 2000; Swan & Allan, 1998), im ungünstigsten Fall behindern sie diese sogar (Sebrechts et al., 1999). In hierarchischen Baumstrukturen von Daten und Dokumenten dauert die



Informationssuche und das Verschaffen eines Überblicks mit 3D-Visualisierungen sogar länger als mit vergleichbaren 2D-Varianten (Cockburn & McKenzie, 2000; Kobsa, 2004). Offensichtlich ist bei diesen Benutzungsoberflächen die optimale Gestaltung der Interaktion für die jeweilige Aufgabe und Nutzergruppe wichtiger als eine Visualisierung in 2D oder 3D. Insgesamt sind 3D-Anzeigen verzweigter Menüstrukturen, langer Listen und der Ergebnisse von Suchfunktionen keine sinnvollen 3D-Anwendungsmöglichkeiten, egal ob in Fahrzeugen oder in anderen Nutzungskontexten. Aus diesem Grund wurde die Visualisierung von Relationen als potentieller 3D-Vorteil verworfen und in dieser Arbeit nicht empirisch untersucht.

**Fazit und Ausblick.** In dieser Arbeit wurde nachgewiesen, dass die Vorteile von 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme wie den Abstandsregeltempomaten in einer Erhöhung der Attraktivität und in einer Verbesserung des unmittelbaren Verständnisses der Anzeigeninhalte im Vergleich zu 2D-Anzeigen liegen können. Gleichzeitig wurden mit optimal gestalteten 3D-Anzeigen keine Nachteile in der Wahrnehmungssicherheit und in der Ablenkungswirkung festgestellt. Anhand der Ergebnisse der Literaturanalyse und der Experimente wurden Gestaltungshinweise für 3D-Anzeigen in Fahrzeugen formuliert. Auch wenn sich der für 3D-Anzeigen von Fahrerassistenzsystemen der erwartete Vorteil einer kompatiblen Darstellung der Informationen über die Fahrzeugumgebung aus der Fahrerperspektive nicht einstellte, so bleibt dies für Aufgaben, welche einen kontinuierlichen Abgleich von Anzeige und Außensicht erfordern (z.B. Navigation), in weiterführenden Untersuchungen zu überprüfen. Die stereoskopische Darbietung von 3D-Anzeigen erbrachte alles in allem keinen besonderen Nutzen. Das verwendete fahrzeugtaugliche autostereoskopische Display reduzierte sogar die Wahrnehmungsgeschwindigkeit. Zusammengefasst sprechen die Ergebnisse für eine gezielte Verwendung von bildhaften monoskopischen 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme sowie für räumliche Funktionen, welche anhand von Begriffen schwer zu erläutern sind (z.B. Sitz-, Fahrzeug-, Licht-, Klima- und Klangeinstellungen).

Einschränkend muss darauf hingewiesen werden, dass die positive Bewertung der Attraktivität von 3D-Anzeigen im Wesentlichen durch den Realismus der Anzeige und nicht durch die perspektivische Darstellung per se verursacht wurde. Da sich außerdem eine 2D-Draufsicht für Aufgaben mit einer konstanten Anordnung der Informationen hinsichtlich der räumlichen Kompatibilität als ausreichend sowie hinsichtlich der Auflösung in der Tiefe und einer größeren Übersicht als optimal erwiesen hat, bleibt zu überprüfen, inwieweit die Ergänzung einer 2D-Draufsicht durch realistische 3D-Objekte

und graphische 3D-Effekte geeignet wäre, die erwähnten Vorteile von 3D-Anzeigen für Fahrerassistenzsysteme aufzuholen.

Realitätsnahe 3D-Anzeigen werden zwar als sehr attraktiv eingeschätzt, können aber wegen ihrer höheren visuellen Komplexität die Wahrnehmungssicherheit reduzieren. Auch wenn die Einbußen in der Wahrnehmungssicherheit in dieser Arbeit zu gering waren, um sich negativ auf die Ablenkung auszuwirken, muss der Kompromiss zwischen Attraktivität und visueller Komplexität im Einzelfall abgeschätzt und überprüft werden.

Darüber hinaus kann aufgrund der Ergebnisse dieser Arbeit nicht geschlussfolgert werden, dass nur bildhafte 3D-Anzeigen in der Lage wären, das unmittelbare Verständnis zu steigern. Unmittelbar verständliche bildhafte Darstellungen lassen sich auch mit 2D-Anzeigen realisieren (vgl. Kebeck et al., 1997; McDougall et al., 1999; McDougall et al., 2000; Schramek, 2003). Weiterführende Experimente sind notwendig, um die Besonderheiten der Vorteile bildhafter 3D- gegenüber 2D-Anzeigen aufzuklären.

Ob sich auch für andere 3D-Anzeigen als die des Abstandsregeltempomaten keine Nachteile in der Wahrnehmungssicherheit und in der Ablenkungswirkung und zeigen, muss letztlich mit jeder einzelnen Anzeige überprüft werden, da diese potentiellen Grenzen von 3D-Anzeigen von deren Gestaltung abhängig sind. Es sind weiterführende Untersuchungen mit anderen Anzeigen und Aufgaben notwendig, um anhand einer breiteren Basis empirischer Daten gesicherte allgemeine Aussagen zur Wahrnehmungssicherheit und Ablenkungswirkung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen treffen zu können.

Da bei der Nutzung von Navigationssystemen ein kontinuierlicher Abgleich zwischen Außensicht und Anzeige speziell beim Widererkennen der eigenen Position in einer Karte bzw. eines in einer Karte dargestellten Abbiegepunktes in der Realität zu erwarten ist, sollte der 3D-Vorteil der räumlichen Kompatibilität an diesem Beispiel weiterführend untersucht werden. Bisher sind keine empirischen Befunde darüber bekannt, inwieweit eine perspektivische Darstellung der konventionellen Karte (z.B. „Vogelperspektive“ in aktuellen Navigationsgeräten) bzw. eine dazu ergänzende 3D-Darstellung von Objekten in der Karte tatsächlich objektive Vorteile bei der Navigation erbringt.

Die potentiellen 3D-Vorteile der Aufmerksamkeitslenkung und Integration, die in dieser Arbeit nicht untersucht wurden, eignen sich ebenfalls als Gegenstand zukünftiger Experimente.

Auch wenn die vorliegende Arbeit nur einige ausgewählte Fragen behandeln konnte und sich darüber hinaus im Verlauf der Arbeit neue Fragestellungen auftaten, stellt sie einen ersten Schritt auf dem Wege einer systematischen Untersuchung der Gestaltungsoptionen, des Nutzens und der Grenzen von

3D-Anzeigen in Fahrzeugen dar. Eine Fortsetzung dieses Weges in weiteren Experimenten mit anderen Anzeigen und Aufgaben erscheint durchaus lohnenswert, um eine breitere Datenbasis für allgemeine Aussagen zur Verwendung von 3D-Anzeigen in Fahrzeugen zu gewinnen. Unbedingt hervorzuheben ist dabei die Untersuchung des objektiven Nutzens verschiedener 3D-Anzeigen von Navigationskarten.



## Literaturverzeichnis

3DNA Corp. (2004). 3DNA [Software]. Verfügbar unter: <http://www.3dna.net> [Zugriff am 10.09.2006].

Agarawala, A. & Balakrishnan, R. (2006). Keepin' it real: Pushing the desktop metaphor with physics, piles and the pen. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 1283-1292). New York: ACM Press

Ajzen, I. (1985). From intentions to actions: A theory of planned behavior. In J. Kuhl & J. Beckmann (Hrsg.), *Action control: From cognition to behavior* (S. 11-39). Berlin: Springer.

Akyol, S., Libuda, L. & Kraiss, K.-F. (2001). Multimodale Benutzung adaptiver Kfz-Bordsysteme. In T. Jürgensohn & K.-P. Timpe (Hrsg.), *Kraftfahrzeugführung* (S. 137-154). Berlin: Springer.

Alexander, A. L. & Wickens, C. D. (2003, April 14-17). *The effects of spatial awareness biases on maneuver choice in a cockpit display of traffic information*. Paper presented at the 12th International Symposium on Aviation Psychology, Dayton, OH.

Alexander, A. L., Wickens, C. D. & Merwin, D. H. (2005). Perspective and coplanar cockpit displays of traffic information: Implications for maneuver choice, flight safety, and mental workload. *International Journal of Aviation Psychology*, 15(1), 1-21.

Alliance of Automobile Manufacturers. (2006). *Statement of principles, criteria and verification procedures on driver interactions with advanced in-vehicle information and communication systems*: Driver Focus - Telematics Guideline.

Alm, T., Lif, P. & Öberg, M. (2003, April 14-17). *Evaluation of monocular depth cues in 3D aircraft displays*. Paper presented at the 12th International Symposium on Aviation Psychology, Dayton, OH.

Ambinder, M. S. & Simons, D. J. (2005). Attention capture: The interplay of expectations, attention, and awareness. In L. Itti, G. Rees & J. Tsotsos (Hrsg.), *Neurobiology of attention* (S. 69-75). San Diego, CA: Elsevier.

Anderson, G. J. & Kramer, A. F. (1993). Limits of focused attention in three-dimensional space. *Perception & Psychophysics*, 53(6), 658-667.

Andre, A. D. & Wickens, C. D. (1995). When users want what's not best for them. *Ergonomics in Design*, October, 10-14.

Aretz, A. J. (1991). The design of electronic map displays. *Human Factors*, 33(1), 85-101.

- Aretz, A. J. & Wickens, C. D. (1992). The mental rotation of map displays. *Human Performance*, 5(4), 303-328.
- Ark, W., Dryer, D. C., Selker, T. & Zhai, S. (1998). Representation matters: The effect of 3D objects and a spatial metaphor in a graphical user interface. In H. Johnson, N. Lawrence & C. Roast (Hrsg.), *People and Computers XIII: Proceedings of HCI '98* (S. 209-219). London: Springer.
- Arnott, S. R. & Shedden, J. M. (2000). Attention switching in depth using random-dot autostereograms: Attention gradient asymmetries. *Perception & Psychophysics*, 62(7), 1459-1473.
- Atchley, P. & Kramer, A. F. (2000). Age-related changes in the control of attention in depth. *Psychology and Aging*, 15(1), 78-87.
- Atchley, P. & Kramer, A. F. (2001). Object and space-based attentional selection in three-dimensional space. *Visual Cognition*, 8(1), 1-32.
- Atchley, P., Kramer, A. F., Anderson, G. J. & Theeuwes, J. (1997). Spatial cuing in a stereoscopic display: Evidence for a "depth-aware" attentional focus. *Psychonomic Bulletin & Review*, 4(4), 524-529.
- Bainbridge, L. (1983). The ironies of automation. *Automatica*, 19, 775-779.
- Banton, P., Thompson, P. & Quinlan, P. T. (2001). Effects of geometric field of view on stereoscopic spatial judgements. *Human Factors*, 43(3), 405-414.
- Barfield, W. & Kim, Y. (1991). Effect of geometric parameters of perspective on judgements of spatial information. *Perceptual and Motor Skills*, 73, 619-623.
- Barfield, W. & Robless, R. (1989). The effects of two- and three-dimensional graphics on the problem-solving performance of experienced and novice decision makers. *Behavior & Information Technology*, 8(5), 369-385.
- Barfield, W. & Rosenberg, C. (1995). Judgments of azimuth and elevation as a function of monoscopic and binocular depth cues using a perspective display. *Human Factors*, 37(1), 173-181.
- Barfield, W., Rosenberg, C. & Furness, T. A., III. (1995). Situation awareness as a function of fame of reference, computer-graphics, eyepoint elevation, and geometric field of view. *The International Journal of Aviation Psychology*, 5(3), 233-256.
- Barfield, W., Sandford, J. & Foley, J. (1988). The mental rotation and perceived realism of computer-generated three-dimensional images. *International Journal of Man-Machine Studies*, 29, 669-684.

- Barfield, W., Zeltzer, D., Sheridan, T. & Slater, M. (1995). Presence and performance within virtual environments. In W. Barfield & T. A. Furness, III (Hrsg.), *Virtual reality and advanced interface design*. New York: Oxford University Press.
- Bederson, B. B. (2000). Fisheye Menus. In M. Ackerman & K. Edwards (Hrsg.), *Proceedings of ACM Conference on User Interface Software and Technology* (S. 217-226). New York: ACM Press.
- Bemis, S. V., Leeds, J. L. & Winer, E. A. (1988). Operator performance as a function of type of display: Conventional versus perspective. *Human Factors*, 30(2), 163-169.
- Bengler, K., Huesmann, A. & Praxenthaler, M. (2003). Investigation of visual demand in a static driving simulator within the ADAM project. In H. Strasser, et al. (Hrsg.), *Qualität von Arbeit und Produkt in Unternehmen der Zukunft: Proceedings of the Annual Spring Conference of the GfA* (S. 49-53). Stuttgart: Ergonomia.
- Bengler, K., Praxenthaler, M., Theofanou, D. & Eckstein, L. (2004, September, 13-15). *Investigation of visual demand in different driving simulators within the ADAM project*. Paper presented at the Driving Simulation Conference Europe, Paris.
- Biocca, F., Kim, T. & Levy, M. R. (1995). The vision of virtual reality. In F. Biocca & M. R. Levy (Hrsg.), *Communication in the age of virtual reality* (S. 3-14). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Blythe, M. A., Overbeeke, K., Monk, A. F. & Wright, P. C. (Hrsg.). (2004). *Funology: From usability to enjoyment*. Dordrecht, NL: Kluwer Academic Publishers.
- Bortz. (1993). *Statistik für Sozialwissenschaftler* (4. Aufl.). Berlin: Springer.
- Bowman, D. A., Kruijff, E., LaViola, J. J., Jr. & Poupyrev, I. (2004). *3D user interfaces: Theory and practice*. Boston: Addison-Wesley.
- Braunstein, M. L. & Anderson, G. J. (1984). Shape and depth perception from parallel projects of three-dimensional motion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 10, 749-760.
- Brown, M. E. & Gallimore, J. J. (1995). Visualization of three dimensional structure during computer-aided design. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 7(1), 37-56.
- Bruno, N. & Cutting, J. E. (1988). Minimodularity and the perception of layout. *Journal of Experimental Psychology: General*, 117(2), 161-170.

- Campbell, F. W. & Westheimer, G. (1960). Dynamics of accommodation responses of the human eye. *Journal of Physiology*, 151, 285-295.
- Card, S. K., Hong, L., Mackinlay, J. D. & Chi, E. H. (2004). 3Book: A scalable 3D virtual book. In *CHI '04 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (S. 1095 - 1098). New York, NY: ACM Press.
- Card, S. K., Robertson, G. & York, W. (1996). The WebBook and the Web Forager: An information workspace for the World-Wide Web. In M. J. Tauber, et al. (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems: Common Ground* (S. 111-117). New York: ACM Press.
- Carsten, O. M. J., Merat, N., Janssen, W. H., Johansson, E., Fowkes, M. & Brookhuis, K. A. (2005). HASTE final report (Human Machine Interaction and the Safety of Traffic in Europe). Verfügbar unter: [http://www.its.leeds.ac.uk/projects/haste/downloads/Haste\\_D6.pdf](http://www.its.leeds.ac.uk/projects/haste/downloads/Haste_D6.pdf) [Zugriff am 20.01.2007].
- Carswell, C. M., Frankenberger, S. & Bernhard, D. (1991). Graphing in depth: Perspectives on the use of three-dimensional graphs to represent lower-dimensional data. *Behavior & Information Technology*, 10(6), 459-474.
- Chau, A. W. & Yeh, Y.-Y. (1995). Segregation by color and stereoscopic depth in three-dimensional visual space. *Perception & Psychophysics*, 57(7), 1032-1044.
- Clockwise Technologies Ltd. (2001). Win3D [Software]. Verfügbar unter: <http://www.win3D.com> [Zugriff am 10.09.2006].
- Cockburn, A. (2004). Revisiting 2D vs 3D implications on spatial memory. In *Proceedings of the Fifth Conference on Australasian User Interface* (Bd. 28, S. 25 - 31). Darlinghurst, Australia: Australian Computer Society, Inc.
- Cockburn, A. & McKenzie, B. (2000). An evaluation of cone trees. In *People and Computers XIV: Proceedings of the 2000 British Computer Society Conference on Human Computer Interaction* (S. 425-436). London: Springer.
- Cockburn, A. & McKenzie, B. (2001). 3D or not 3D? Evaluating the effect of the third dimension in a document management system. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 434-441). New York: ACM Press.
- Cockburn, A. & McKenzie, B. (2002). Evaluating the effectiveness of spatial memory in 2D and 3D physical and virtual environments. In J. Jacko & A. Sears (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems: Changing our World, Changing Ourselves* (S. 203-210). New York: ACM Press.



- Colle, H. A. & Reid, G. B. (2003). Spatial orientation in 3-D desktop displays: Using rooms for organizing information. *Human Factors*, 45(3), 424-435.
- Cooper, L. A. (1976). Demonstration of a mental analog of an external rotation. *Perception and Psychophysics*, 19(4), 296-302.
- Cooper, L. A. & Shepard, R. N. (1973). Chronometric studies of the rotation of mental images. In W. G. Chase (Hrsg.), *Visual information processing* (S. 75-176). New York: Academic Press.
- Cooper, L. A. & Shepard, R. N. (1975). Mental transformations in the identification of left and right hands. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 104(1), 48-56.
- Couyoumdijan, A., Di Nocera, F. & Ferlazzo, F. (2003). Functional representation of 3D space in endogenous attention shifts. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 56A(1), 155-183.
- Cutting, J. E. & Vishton, P. M. (1995). Perceiving layout and knowing distances: The integration, relative potency, and contextual use of different information about depth. In W. Epstein & S. Rogers (Hrsg.), *Perception of space and motion* (S. 69-117). San Diego, CA: Academic Press.
- Darken, R. P. & Sibert, J. L. (1996). Navigating large virtual spaces. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 8(1), 49-71.
- Dassault Systems. (2003). CATIA V5R12 [Software]. Verfügbar unter: <http://www.3ds.com/de/corporate/about-us/brands/catia/> [Zugriff am 09.04.2007].
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2006). *DIN EN ISO 9241 -110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung*.
- Dingus, T. A., Antin, J. F., Hulse, M. C. & Wierwille, W. W. (1989). Attentional demand requirements of an automobile moving-map navigation system. *Transportation Research*, 23(4), 301-315.
- Dosher, B. A., Sperling, G. & Wurst, S. A. (1986). Tradeoffs between stereopsis and proximity luminance covariance as determinants of perceived 3D structure. *Vision Research*, 26(6), 973-990.
- Downing, C. J. & Pinker, S. (1985). The spatial structure of visual attention. In M. I. Posner & O. S. M. Martin (Hrsg.), *Attention and Performance XI* (S. 171-187). Hillsdale, NJ: Erlbaum.
- Downs, R. M. & Stea, D. (1982). *Kognitive Karten: Die Welt in unseren Köpfen*. New York: Harper & Row.

- Duncan, J. (1984). Selective attention and the organization of visual information. *Journal of Experimental Psychology: General*, 113(4), 501-517.
- Ehret, B. D. (2002). Learning where to look: Location learning in graphical user interfaces. In J. Jacko & A. Sears (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems: Changing our World, Changing Ourselves* (S. 211-218). New York: ACM Press.
- Eley, M. G. (1988). Determining the shapes of land surfaces from topographical maps. *Ergonomics*, 31(3), 355-376.
- Ellis, S. R. (2000). On the design of perspective displays. In *Proceedings of the 44th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (S. 411-414). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Ellis, S. R., McGreevy, M. W. & Hitchcock, R. J. (1987). Perspective traffic display format and air pilot traffic avoidance. *Human Factors*, 29(4), 371-382.
- Ellis, S. R., Tharp, G., Grunwald, A. & Smith, S. (1991). Exocentric judgments in real environments and stereoscopic displays. In *Proceedings of the Human Factors Society 35th Annual Meeting* (S. 1442-1446). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Endsley, M. (1995). Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Human Factors*, 37(1), 32-64.
- Endsley, M. (1999). Situation awareness in aviation systems. In D. G. Garland, J. A. Wise & V. D. Hopkin (Hrsg.), *Handbook of aviation human factors* (S. 257-276). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Evans, J. L. & Stevens, A. (1997). Measures of graphical complexity for navigation and route guidance displays. *Displays*, 17, 89-93.
- Fadden, S., Ververs, P. M. & Wickens, C. D. (1998). Costs and benefits of head-up display use: A meta-analytic approach. In *Proceedings of the 42nd Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (S. 16-20). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Falter, H., Rötting, M. & Springer, J. (1993). Zur Problematik der Verwendung von Displays zur dreidimensionalen Wahrnehmung. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaften*, 47(19 NF), 198-205.
- Fisher, E., Haines, R. & Price, T. (1980). *Cognitive issues in head-up displays* (NASA Technical Paper 1711). Washington, DC: National Aeronautics and Space Administration (NASA).
- Fitts, P. M. & Deininger, R. L. (1954). S-R compatibility: Correspondence among paired elements within stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 48(6), 483-492.

- Fitts, P. M. & Seeger, C. M. (1953). Compatibility: Spatial characteristics of stimulus and response codes. *Journal of Experimental Psychology*, 46(3), 199-210.
- Franklin, N. & Tversky, B. (1990). Searching imaged environments. *Journal of Experimental Psychology: General*, 119(1), 63-76.
- Furnas, G. W. (1986). Generalized fisheye views. In M. Mantei & P. Orbeton (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 16-23). New York: ACM Press.
- Garcia, M., Badre, A. N. & Stasko, J. T. (1994). Development and validation of icons varying in their abstractness. *Interacting with Computers*, 6(2), 191-211.
- Gawryszewski, L. D. G., Riggio, L., Rizzolatti, G. & Umitlá, C. (1987). Movements of attention in the three spatial dimensions and the meaning of "neutral" cues. *Neuropsychologia*, 25(1A), 19-29.
- Ghirardelli, T. G. & Folk, C. L. (1996). Spatial cuing in a stereoscopic display: Evidence for a "depth-blind" attentional spotlight. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3(1), 81-86.
- Gibson, J. J. (1979). *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Gillan, D. J. & Richman, E. H. (1994). Minimalism and the syntax of graphs. *Human Factors*, 36(4), 619-644.
- Goldberg, J., MacEachren, A. & Korval, X. (1992). Mental image transformations in terrain map comparison. *Cartographia*, 29(2), 46-59.
- Goldstein, B. E. (1997). *Wahrnehmungspsychologie* (G. Herbst, Übers.). Heidelberg: Spektrum. (Originaltitel: *Sensation and Perception*, 4. Aufl., 1996).
- Green, P. & Williams, M. (1992). Perspective orientation/navigation displays: A human factors test. In *Proceedings of the In-Vehicle Navigation and Information Systems Conference* (S. 231-237). Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- Grossman, T. & Balakrishnan, R. (2006). An evaluation of depth perception on volumetric displays. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces* (S. 193-200). New York: ACM Press.
- Gugerty, L. & Brooks, J. (2004). Reference-frame misalignment and cardinal direction judgments: group differences and strategies. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 10(2), 75-88.

- Hacker, W. (1999). *Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Bern: Verlag Hans Huber.
- Haik, E., Barker, T., Sapsford, J. & Trainis, S. (2002). Investigation into effective navigation in desktop virtual interfaces. In *Proceeding of the Seventh International Conference on 3D Web Technology* (S. 59 - 66). New York: ACM Press.
- Halper, N., Mellin, M., Herrmann, C.-S., Linneweber, V. & Strothotte, T. (2003). Psychology and non-photorealistic rendering: The beginning of a beautiful relationship. In G. Szwillus & J. Ziegler (Hrsg.), *Mensch & Computer 2003 - Interaktion in Bewegung* (S. 277-286). Stuttgart: Teubner.
- Hammer, M. (1998). *Stereoskopische Informationsdarstellung am Beispiel eines Flugführungsdisplays*. Aachen: Shaker Verlag.
- Han, S., Wan, X. & Humphreys, G. W. (2005). Shifts of spatial attention in perceived 3-D space. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 58A(4), 753-764.
- Häring, C. (2004). *Einfluß perspektivischer Parameter auf die Schätzung von Distanzen auf 3D-Displays für Fahrerassistenzsysteme*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Universität Mannheim.
- Haskell, I. D. & Wickens, C. D. (1993). Two- and three-dimensional displays for aviation: A theoretical and empirical comparison. *The International Journal of Aviation Psychology*, 3(2), 87-109.
- Hassenzahl, M. (2006). Hedonic, emotional, and experiential perspectives on product quality. In C. Ghaoui (Hrsg.), *Encyclopedia of human computer interaction* (S. 266-272). Hershey, PA: Idea Group Reference.
- Hassenzahl, M. & Tractinsky, N. (2006). User experience - A research agenda [Editorial]. *Behaviour & Information Technology*, 25(2), 91-97.
- He, Z. J. & Nakayama, K. (1995). Visual attention to surfaces in three-dimensional space. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92(24), 11155-11159.
- Helander, M. & Tham, M. P. (2003). Hedonomics [special issue]. *Ergonomics*, 46(13-14).
- Heller, D., Michaelis, J., Krummenacher, J. & Radach, R. (2003). *3D Darstellungen in Navigationsgeräten* (Unveröffentlichter Bericht). Aachen: RWTH.
- Hendrix, C. & Barfield, W. (1997). Spatial discrimination in three-dimensional displays as a function of computer graphics eyepoint elevation and stereoscopic viewing. *Human Factors*, 39(4), 602-617.

- Herndon, K. P., van Dam, A. & Gleicher, M. (1994). The challenges of 3D interaction. *SIGCHI Bulletin*, 26(4), 36-43.
- Hickox, J. C. & Wickens, C. D. (1999). Effects of elevation angle, complexity and feature type on relating out-of-cockpit field of view to an electronic cartographic map. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 5(3), 284-301.
- Hicks, M., O'Malley, C., Nichols, S. & Anderson, B. (2003). Comparison of 2D and 3D representations for visualising telecommunication usage. *Behavior & Information Technology*, 22(3), 185-201.
- Hoedemaeker, M. & Brookhuis, K. A. (1998). Behavioral adaptation to driving with an adaptive cruise control (ACC). *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 1(2), 95-106.
- Hollands, J. G., Pierce, B. J. & Magee, L. (1998). Displaying information in two and three dimensions. *International Journal of Cognitive Ergonomics*, 2(4), 307-320.
- Hommel, B. & Prinz, W. (Hrsg.). (1997). *Theoretical issues in stimulus-response-compatibility*. Amsterdam: North-Holland.
- Hsu, J., Pizlo, Z., Chelberg, D. M., Babbs, C. F. & Delp, E. J. (1996). Issues in the design of studies to test the effectiveness of stereo imaging. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, 26(6), 810-819.
- Hutarew, G., Moser, K. & Dietze, O. (2004). Comparison of an auto-stereoscopic display and polarized stereoscopic projection for macroscopic pathology. *Journal of Telemedicine and Telecare*, 10(4), 206-213.
- Iavecchia, H. P. & Folk, C. L. (1994). Shifting visual attention in stereographic displays: A time course analysis. *Human Factors*, 36(4), 606-618.
- Ichikawa, M. & Saida, S. (1996). How is motion disparity integrated with binocular disparity in depth perception? *Perception & Psychophysics*, 58, 271-282.
- Ijsselstein, W. A., Seuntjens, P. J. H. & Meesters, L. M. J. (2005). Human factors of 3D displays. In O. Schreer, P. Kauff & T. Sikora (Hrsg.), *3D videocommunication* (S. 119-233). West Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- International Organization for Standardization. (2000?). *ISO 2575: Road vehicles - Symbols for controls, indicators and tell-tales*.
- International Organization for Standardization. (2002). *ISO 15007-1: Road vehicles – Measurement of driver visual behaviour with respect to transport information and control systems – Part 1: Definitions and parameters*.

International Organization for Standardization. (2003a). *ISO 15008: Road vehicles – Ergonomic aspects of transport information and control systems – Specifications and compliance procedures for in-vehicle visual presentation*.

International Organization for Standardization. (2003b). *ISO 17287: Road vehicles – Ergonomic aspects of transport and control systems – Procedure for assessing suitability for use while driving*.

International Organization for Standardization. (2007). *ISO TC 22/ SC 13 / WG 8 / LCT 079: Road vehicles - Ergonomic aspects of transport information and control systems - Simulated lane change test to asses in-vehicle secondary task demand*.

Irani, P. & Ware, C. (2003). Diagramming information structures using 3D perceptual primitives. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction* 10(1), 1-19.

Japan Automobile Manufacturers Association. (2004). *Guideline for in-vehicle display systems - Version 3.0*.

Jensen, C. R. & Anderson, L. A. (1987). Comparing three-dimensional representations of data to scatterplots. In *Proceedings of the 31st Annual Meeting of the Human Factors Society* (S. 1176-1181). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.

Jordan, P. W. (2000). *Designing pleasurable products*. London: Taylor & Francis.

Julesz, B. (1971). *Foundations of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press.

Kebeck, G., Cieler, S. & Pohlmann, S. (1997). *Vergessene Ergonomie: Gedächtnispsychologische Aspekte der Gestaltung von Displays*. Münster: Lit-Verlag.

Kim, W. S., Ellis, S. R., Tyler, M. E., Hannaford, B. & Stark, L. W. (1987). Quantitative evaluation of perspective and stereoscopic displays in three-axis manual tracking tasks. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, 17(1), 61-71.

Kim, W. S., Tendick, F. & Stark, L. (1987). Visual Enhancements in pick and place tasks: Human operator controlling a simulated cylindrical manipulator. *IEEE Journal of Robotics and Automation* , RA-3(5), 418-425.

Kobsa, A. (2004). User experiments with tree visualization systems. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization (INFOVIS '04)* (S. 9 -16). Washington, DC: IEEE Computer Society

- Kollmann, T. (1998). *Akzeptanz innovativer Nutzungsgüter und -systeme*. Wiesbaden: Gabler.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften. (2000). Empfehlung der Kommission vom 21. Dezember 1999 an die Mitgliedstaaten und die Industrie über sichere und effiziente On-board-Informations- und Kommunikationssysteme: Europäischer Grundsatzkatalog zur Mensch-Maschine-Schnittstelle. *Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften*, L19(25.01.2000), 64-68.
- Kommission der Europäischen Gemeinschaften. (2005). *European statement of principles on the design of human machine interaction* (Draft by the task force HMI).
- Kooi, F. L. & Toet, A. (2004). Visual comfort of binocular and 3D displays. *Displays*, 25(2-3), 99-108.
- Kornblum, S., Hasbroucq, T. & Osman, A. (1990). Dimensional overlap: Cognitive basis for stimulus-response compatibility - A model and taxonomy. *Psychological Review*, 97(2), 253-270.
- Künnapas, T. (1968). Distance perception as a function of available visual cues. *Journal of Experimental Psychology*, 77(4), 523-529.
- Lamping, J., Rao, R. & Pirolli, P. (1995). A focus + context technique based on hyperbolic geometry for visualizing large hierarchies. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems: Mosaic of Creativity* (S. 401-408). New York: ACM Press.
- Landau, k. (2002). The development of driver assistance systems following usability criteria. *Behavior & Information Technology*, 21(5), 341-344.
- Larkin, J. H. & Simon, H. A. (1987). Why a diagram is (sometimes) worth ten thousand words. *Cognitive Science*, 11, 65-99.
- Levine, M. (1982). You-are-here maps: Psychological considerations. *Environment and Behavior*, 14(2), 221-237.
- Levy, E., Zacks, J., Tversky, B. & Schiano, D. (1996). Gratuitous graphics? Putting preferences in perspective: empirical studies of graphics and visual design. In M. J. Tauber, et al. (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems: Common Ground* (S. 42-49). New York: ACM Press.
- Liao, M.-J. & Johnson, W. W. (2004). Characterizing the effects of droplines on target acquisition performance on a 3-D perspective display. *Human Factors*, 46(3), 476-496.

- Liter, J. C., Tjan, B. S., Bülthoff, H. H. & Köhnen, N. (1998). *Viewpoint effects in naming silhouette and shaded images of familiar objects* (Technischer Bericht Nr. 54). Tübingen: Max-Planck Institut für Biologische Kybernetik.
- Liu, J., Pastoor, S., Seifert, K. & Hurtienne, J. (2000, November, 5-8). *Three-dimensional PC-toward novel forms of human-computer interaction*. Paper presented at the Three-Dimensional Video and Display: Devices and Systems (SPIE CR76), Boston, MA.
- Liu, Y., Zhang, X. & Chaffin, D. (1997). Perception and visualization of human posture information for computer-aided ergonomic analysis. *Ergonomics*, 40(8), 818-833.
- Loftus, G. R. & Masson, M. E. J. (1994). Using confidence intervals in within-subjects designs. *Psychonomic Bulletin & Review*, 1(4), 476-490.
- Marrara, M. T. & Moore, C. M. (2000). Role of perceptual organization while attending in depth. *Perception & Psychophysics*, 62(4), 786-799.
- Mattes, S. (2003). The lane-change-task as a tool for driver distraction evaluation. In H. Strasser, et al. (Hrsg.), *Quality of work and products in enterprises of the future* (S. 57-60). Stuttgart: Ergonomia.
- Mattes, S. & Hallen, A. (2007). Surrogate measurement techniques: The lane change test (Kapitel 7). In M. A. Regan, J. D. Lee & K. L. Young (Hrsg.), *Driver distraction: theory, effects and mitigation*. Boca Raton: CRC Press. (Manuskript zur Veröffentlichung akzeptiert).
- Mazur, K. M. & Reising, J. M. (1990). The relative effectiveness of three visual depth cues in a dynamic air situation display. In M. E. Wiklund (Hrsg.), *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Human Factors Society* (S. 16-20). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- McCarley, J. S. & He, Z. J. (2001). Sequential priming of 3-D perceptual organization. *Perception & Psychophysics*, 63(2), 195-208.
- McCloy, R. & Stone, R. (2001). Virtual reality in surgery. *British Medical Journal*, 323, 912-915.
- McCormick, E., Wickens, C. D., Banks, R. & Yeh, M. (1998). Frame of reference effects on scientific visualization subtasks. *Human Factors*, 40(3), 443-451.
- McDougall, S. J. P., Curry, M. B. & de Bruijn, O. (1999). Measuring symbol and icon characteristics: Norms for concreteness, complexity, meaningfulness, familiarity, and semantic distance for 239 symbols. *Behavior Research methods, Instruments & Computers*, 31(3), 487-519.



- McDougall, S. J. P., de Bruijn, O. & Curry, M. B. (2000). Exploring the effects of icon characteristics on user performance: The role of icon concreteness, complexity, and distinctiveness. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 6(4), 291-306.
- McDougall, S. J. P., Tyrer, V. & Folkard, S. (2006). Searching for signs, symbols, and icons: Effects of time of day, visual complexity, and grouping. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 12(2), 118-128.
- McGreevy, M. W. & Ellis, S. R. (1986). The effect of perspective geometry on judged direction in spatial information instruments. *Human Factors*, 28(4), 439-456.
- McNamara, T. P. (1986). Mental representations of spatial relations. *Cognitive Psychology*, 18(1), 87-121.
- McWorther, S. W., Hodges, L. F. & Rodriguez, W. E. (1991). *Comparison of 3D display formats for CAD applications* (Tech. Report GIT-GVU-91-04). Atlanta: Georgia Institute of technology, Graphics, visualization, and Usability Center.
- Meng, L. (2002). How can 3D geovisualization please users eyes better? *Geoinformatics Magazine for Geo-IT Professionals*, 5, 34-35.
- Meng, L. (2003). About the emotional requirements of map users. In A. Wolodtschenko & H. Schlichtmann (Hrsg.), *Diskussionsbeiträge zur Kartosemiotik und zur Theorie der Kartographie* (S. 27-34). Dresden: Technische Universität zu Dresden.
- Merwin, D. H., Vincow, M. A. & Wickens, C. D. (1994). Visual analysis of scientific data: Comparison of 3-D-topographic, color, gray scale displays in a feature detection task. In *Proceeding of the Human Factors and Ergonomics Society 38th Annual Meeting* (S. 240-244). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Meyer, J. (2002). *Entwicklung eines Fragebogens zur Erfassung der Akzeptanz von innovativen Systemen im Fahrzeug*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, Humboldt-Universität, Berlin.
- Miller, G., Grisedale, S. & Anderson, K. T. (1999). 3Desque: Interface elements for a 3D graphical user interface. *The Journal of Visualization and Computer Animation (now Computer Animation and Virtual Worlds)*, 10(2), 109-119.
- Mohs, C., Hurtienne, J., Scholz, D. & Rötting, M. (2006). Intuitivität: Definierbar, beeinflussbar, überprüfbar! In Gesellschaft für Mess- und

Automatisierungstechnik (VDI/VDE) (Hrsg.), *Useware 2006 - Nutzergerechte Gestaltung technischer Systeme* (S. 215-224). Düsseldorf: VDI Verlag.

Mon-Williams, M. & Wann, J. P. (1998). Binocular virtual reality displays: When problems do and don't occur. *Human Factors*, 40(1), 42-49.

Moore, C. M., Elsinger, C. L. & Lleras, A. (2001). Visual attention and the apprehension of spatial relations: the case of depth. *Perception & Psychophysics*, 63(4), 595-606.

Most, S. B., Scholl, B. J., Clifford, E. R. & Simons, D. J. (2005). What you see is what you set: sustained inattention blindness and the capture of awareness. *Psychological Review*, 112(1), 217-242.

Nakayama, K. & Silverman, G. H. (1986). Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. *Nature*, 320, 264-265.

Neisser, U. & Becklen, R. (1975). Selective looking: attending to visually specified events. *Cognitive Psychology*, 7, 480-494.

Nöller, S. (2001, Mai, 17-18 ). *Navigation in komplexen Hypertextsystemen – ein Webexperiment mit unterschiedlichen Visualisierungstools*. Paper presented at the 4. German Online Research Tagung, Göttingen.

Norman, D. A. (2002). *The design of everyday things*. New York: Basic Books.

Norman, D. A. (2004a). Beauty, goodness, and usability [special section]. *Human-Computer Interaction*, 19(4), 311-318.

Norman, D. A. (2004b). *Emotional design: Why we love (or hate) everyday things*. New York: Basic Books.

Olmos, O., Wickens, C. D. & Chudy, A. (2000). Tactical displays for combat awareness: an examination of dimensionality and frame of reference concepts and the application of cognitive engineering. *The International Journal of Aviation Psychology*, 10(3), 247-271.

Oulasvirta, A., Nivala, A.-M., Tikka, V., Liikkanen, L. & Nurminen, A. (2005, September, 19). *Understanding users' strategies with mobile maps*. Paper presented at the Mobile Maps 2005 Workshop held at Mobile HCI 2005, Salzburg, Austria.

Oviatt, S. (2003). Multimodal interfaces. In J. A. Jacko & A. Sears (Hrsg.), *The human computer interaction handbook - fundamentals, evolving technologies and emerging applications* (S. 286-304). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.

- Park, S. H. & Woldstad, J. C. (2000). Multiple two-dimensional displays as an alternative to three-dimensional displays in telerobotic tasks. *Human Factors*, 42(4), 592-603.
- Pastoor, S. (1993). Human factors of 3D displays in advanced image communications. *Displays*, 14, 150-157.
- Pastoor, S. (2005). 3D displays (Kapitel 13). In O. Schreer, P. Kauff & T. Sikora (Hrsg.), *3D videocommunication*. West-Sussex, UK: John Wiley & Sons.
- Patterson, R. (1997). Visual processing of depth information in stereoscopic displays. *Displays*, 17, 69-74.
- Patterson, R. & Fox, R. (1984). The effect of testing method on stereoanomaly. *Vision Research*, 24(5), 403-408.
- Patterson, R. & Martin, W. L. (1992). Human stereopsis. *Human Factors*, 34(6), 669-692.
- Patterson, R., Moe, L. & Hewitt, T. (1992). Factors that affect depth perception in stereoscopic displays. *Human Factors*, 34(6), 655-667.
- Pepper, R. L., Smith, D. C. & Cole, R. E. (1981). Stereo TV improves operator performance under degraded visibility conditions. *Optical Engineering*, 20(4), 579-585.
- Pirolli, P., Card, S. K. & van der Wege, M. M. (2000). The effect of information scent on searching information visualizations of large tree structures. In *Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces* (S. 161 - 172). New York: ACM Press.
- Pong, T., Kenner, M. A. & Otis, J. (1990). Stereo and motions cues in preattentive vision processing - some experiments with random-dot stereographic image sequences. *Perception*, 19(2), 161-170.
- Preim, B. (1999). *Entwicklung interaktiver Systeme*. Berlin: Springer.
- Pylyshyn, Z. W. (1979). The rate of mental rotation of images: A test of holistic analogue hypothesis. *Memory and Cognition*, 7(1), 19-28.
- Quante, B. & Hopf, K. (2003, Dezember, 1-4). *Evaluation of a single user autostereoscopic display - an example of a user centred design cycle*. Paper presented at the 19th International Symposium on Human Factors in Telecommunication, Berlin.
- Rakkolainen, I. & Vainio, T. (2001). A 3D city info for mobile users *Computers and Graphics*, 25(4), 619-625.

- Rao, R., Pedersen, J. O., Hearst, M. A., Mackinlay, J. D., Card, S. K., Masinter, L., Halvorsen, P.-K. & Robertson, G. (1995). Rich interaction in the digital library. *Communications of the ACM*, 38(4), 29-39.
- Rasmussen, J. (1983). Skills, rules, knowledge: Signals, signs and symbols, and other distinctions in humans performance models. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 13(3), 257-267.
- Reed, M. P. & Green, P. (1999). Comparison of driving performance on-road and in a low cost simulator using a concurrent telephone dialing task. *Ergonomics*, 42(8), 1015-1037.
- Risden, K., Czerwinski, M. P., Munzner, T. & Cook, D. B. (2000). An initial examination of ease of use for 2D and 3D information visualizations of web content. *International Journal of Human-Computer Studies*, 53(5), 695-714.
- Riva, G. (2005). Virtual reality in psychotherapy: Review. *CyberPsychology & Behavior*, 8(3), 220-230.
- Robertson, G., Card, S. K. & Mackinlay, J. D. (1993). Information visualization using 3D interactive animation. *Communications of the ACM [special issue on graphical user interfaces]*, 36(4), 57-71.
- Robertson, G., Mackinlay, J. D. & Card, S. K. (1991). Cone Trees: Animated 3D visualizations of hierarchical information. In S. P. Robertson, G. M. Olson & J. S. Olson (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems: Reaching Through Technology* (S. 189-194). New York: ACM Press.
- Robertson, G., van Dantzich, M., Robbins, D., Czerwinski, M., Hinckley, K., Risden, K., Thiel, D. & Gorokhovskiy, V. (2000). The Task Gallery: A 3D window manager. In T. Turner & G. Szwillus (Hrsg.), *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (S. 494-501). New York: ACM Press.
- Robertson, G. G., Czerwinski, M., Larson, M., Robbins, D., Thiel, D. & Dantich, M., van (1998). Data Mountain: Using spatial memory for document management. In E. Mynatt & R. J. K. Jacob (Hrsg.), *Proceedings of the 11th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (S. 153-162). New York: ACM Press.
- Robertson, L. C. & Kim, M.-S. (1999). Effects of perceived space on spatial attention. *Psychological Science*, 10(1), 76-79.
- Roscoe, S. N. (1968). Airborne displays for flight and navigation. *Human Factors*, 10(4), 321-332.

- Roscoe, S. N. (2004). Moving horizons, control reversals, and graveyard spirals. *Ergonomics in Design*, 12(4), 15-19.
- Rosenberg, C. & Barfield, W. (1995). Estimation of spatial distortion as a function of geometric parameters of perspective. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 25(9), 1323-1333.
- Rötting, M. (1999). Typen und Parameter von Augenbewegungen. In M. Rötting & K. Seifert (Hrsg.), *Blickbewegungen in der Mensch-Maschine-Systemtechnik* (S. 1-18). Sinzheim: Pro Universitatae.
- Rudin-Brown, C. M. & Parker, H. A. (2004). Behavioural adaptation to adaptive cruise control (ACC): Implications for preventive strategies. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(2), 59-76.
- Schattenberg, K. (2002). *Fahrzeugführung und gleichzeitige Nutzung von Fahrerassistenz- und Fahrerinformationssystemen*. Unveröffentlichte Dissertation, RWTH, Aachen. Verfügbar unter: <http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2002/441/> [Zugriff am 04.04.2007].
- Schattenberg, K. & Debus, G. (2001). Multimodale Anzeige- und Bedienkonzepte zur Steuerung technischer Systeme während der Fahrt im Kraftfahrzeug: Evaluationsbefunde zur Systemweiterentwicklung mit paralleler Sprachbedien-ung. In T. Jürgensohn & K.-P. Timpe (Hrsg.), *Kraftfahrzeugführung* (S. 177-193). Berlin: Springer.
- Schiffman, H. R. (2001). *Sensation and perception: An integrated approach* (5. Aufl.). New York: John Wiley & Sons.
- Schowengerdt, B. T. & Seibel, E. J. (2004). True three-dimensional displays that allow viewers to dynamically shift accommodation, bringing objects displayed at different viewing distances into and out of focus. *CyberPsychology & Behavior*, 7(6), 610-620.
- Schramek, W. (2003). *Ohne Worte- oder: Wie man Bilder zum Sprechen bringt. Eine kritische Bewertung von Konstruktionsregeln und Evaluationsmethoden für Icons in Mobiltelefonen*. Unveröffentlichte Diplomarbeit, RWTH, Aachen.
- Schreiber, B., Wickens, C. D., Renner, G., Alton, J. & Hickox, J. (1998). Navigational checking using 3-D maps: The influence of elevation angle, azimuth, and foreshortening. *Human Factors*, 40(2), 209-223.
- Schuemie, M. J., Straaten, P., van der , Krijn, M. & Mast, C. A. P. G., van der. (2001). Research on presence in virtual reality: A survey. *CyberPsychology & Behavior*, 4(2), 183-201.

- Sebrechts, M. M., Cugini, J. V., Laskowski, S. J., Vasilakis, J. & Miller, M. S. (1999). Visualization of search results: A comparative evaluation of text, 2D, and 3D interfaces. In F. Gey, M. A. Hearst & R. Tong (Hrsg.), *Proceedings of the 22nd Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (S. 3-10). New York: ACM Press.
- Seifert, K. (2002). *Evaluation multimodaler Computer-Systeme in frühen Entwicklungsphasen*. Unveröffentlichte Dissertation, Technische Universität, Berlin. Verfügbar unter: [http://edocs.tu-berlin.de/diss/2002/seifert\\_katharina.htm](http://edocs.tu-berlin.de/diss/2002/seifert_katharina.htm) [Zugriff am 04.04.2007].
- Seifert, K., Rötting, M. & Jung, R. (2001). Registrierung von Blickbewegungen im Kraftfahrzeug. In T. Jürgensohn & K.-P. Timpe (Hrsg.), *Kraftfahrzeugführung* (S. 207-228). Berlin: Springer.
- Sexton, I. & Surman, P. (1999). Stereoscopic and autostereoscopic display systems - an in depth review of past, present, and future technologies. *IEEE Signal Processing Magazine*, May, 85-99.
- Shepard, R. N. & Hurwitz, S. (1984). Upward direction, mental rotation, and discrimination of left and right turns in maps. *Cognition*, 18, 161-193.
- Shepard, R. N. & Metzler, D. (1988). Mental rotation: Effects of dimensionality of objects and type of task. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 14(1), 3-11.
- Shepard, R. N. & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703.
- Shneiderman, B. (2003). Why not make interfaces better than 3D reality? *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(6), 12-15.
- Shneiderman, B. (2004). Treemaps for space-constrained visualization of hierarchies. Verfügbar unter: <http://www.cs.umd.edu/hcil/treemap-history> [Zugriff am 10.04.2007].
- Shneiderman, B. & Plaisant, C. (2005). *Designing the user interface: Strategies for effective human-computer interaction* (4. Aufl.). Boston: Pearson Education.
- Siegrist, M. (1996). The use or misuse of three-dimensional graphs to represent lower dimensional data. *Behavior & Information Technology*, 15(2), 96-100.
- Simons, D. J. & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: Sustained inattention blindness for dynamic events. *Perception*, 28, 1059-1074.
- Slater, M. & Wilbur, S. (1997). A framework for immersive virtual environments (FIVE): speculations on the role of presence in virtual environments. *Presence*, 6, 603-616.

- Smallman, H. S., Manes, D. I. & Cowen, M. B. (2003). Measuring and modeling the misinterpretation of 3-D perspective views. In *Proceedings of the 47th Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society* (S. 1615-1619). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Smallman, H. S. & St. John, M. (2005). Naive realism: Misplaced faith in realistic displays. *Ergonomics in Design*, 13(3), 6-13.
- Smallman, H. S., St. John, M. & Cowen, M. B. (2002). Use and misuse of linear perspective in the perceptual reconstruction of 3-D perspective view displays. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 46th Annual Meeting* (S. 1560-1565). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Smallman, H. S., St. John, M. & Oonk, H. M. (2001). Information availability in 2D and 3D displays. *IEEE Computer Graphics and Applications [special issue on Applied Perception]*, 21, 51-57.
- Smallman, H. S., St. John, M., Oonk, H. M. & Cowen, M. B. (2000). When beauty is only skin deep: 3-D realistic icons are harder to identify than conventional 2-D military symbols. In *Proceedings of the International Ergonomics Association XIVth Triennial Congress / Human Factors and Ergonomics Society 44th Annual Meeting* (S. 3480-3483). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Smallman, H. S., St. John, M., Oonk, H. M. & Cowen, M. B. (2001). 'Symbicons': A hybrid symbology that combines the best elements of symbols and icons. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting* (S. 110-114). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Society of Automotive Engineers. (2001). *SAE J2364: Recommended practice for navigation and route guidance functions accessibility while driving*. Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.
- Sollenberger, R. L. & Milgram, P. (1993). Effects of stereoscopic and rotational displays in a three-dimensional path tracking task. *Human Factors*, 35(3), 483-499.
- Spence, I. (1990). Visual psychophysics of simple graphical elements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 16(4), 683-692.
- St. John, M., Cowen, M. B., Smallman, H. S. & Oonk, H. M. (2001). The use of 2D and 3D displays for shape-understanding versus relative-position tasks. *Human Factors*, 43(1), 79-98.

- St. John, M., Smallman, H. S., Bank, T. E. & Cowen, M. B. (2001). *Tactical routing using two-dimensional and three-dimensional views of terrain* (Technical Report Nr. 1849). San Diego, CA: SPAWAR Systems Center (SSC).
- Stanton, N. A. & Young, M. S. (2005). Driver behavior with adaptive cruise control. *Ergonomics*, 48(10), 1294-1313.
- Stasko, J. T. (1992). *Three-dimensional computation visualization* (Technical Report GIT-GVU-92-20). Georgia: Institute of Technology.
- Steiner, B. A. & Dotson, D. A. (1990). The use of 3-D stereo display of tactical information. In *Proceedings of the 34th Annual Meeting of the Human Factors Society* (S. 36-40). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Swan, R. C. & Allan, J. (1998). Aspect windows, 3-D visualizations, and indirect comparisons of information retrieval systems. In B. W. Croft, et al. (Hrsg.), *Proceedings of the 21st Annual International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (S. 173 - 181). New York: ACM Press.
- Székel, G. & Satava, R. M. (1999). Virtual reality in medicine. *British Medical Journal*, 319, 1305-1308.
- Tam, W. & Stelmach, L. (1998). Display duration and stereoscopic depth perception. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 52(1), 56-61.
- Tan, D. S., Stefanucci, J. K., Proffitt, D. R. & Pausch, R. (2001). Kinesthetic cues aid spatial memory. In *CHI '02 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (S. 806 - 807 ). New York: ACM Press.
- Tavanti, M., Le, H.-H. & Dang, N.-T. (2003, Oktober, 12-16). *Three-dimensional stereoscopic visualization for air traffic control interfaces: A preliminary study*. Paper presented at the 22nd Digital Avionics Systems Conference, Indianapolis, USA.
- Tavanti, M. & Lind, M. (2001). 2D vs. 3D, Implications on spatial memory. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization 2001 (INFOVIS'01)* (S. 139-145). Washington, DC: IEEE Computer Society.
- Tendick, F. & Cavusoglu, M. C. (1997). Human-machine interfaces for minimally invasive surgery. In *Proceedings of the 19th International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society* (Bd. 6, S. 2771-2776). Washington, DC: IEEE Computer Society.
- Tham, M. & Wickens, C. D. (1993). *Evaluation of perspective and stereoscopic displays in air traffic control* (Technical Report Nr. ARL-93-4/FAA-93-1). Urbana-Campaign: University, Aviation Research Laboratory



- Theeuwes, J., Atchley, P. & Kramer, A. F. (1998). Attentional control within 3-D space. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 24(5), 1476-1483.
- Theofanou, D. (2002). *Maße zur Erfassung von visueller Ablenkung bei verschieden komplexen Streckenabschnitten*. Unveröffentlichte Dissertation, Universität Regensburg. Verfügbar unter: <http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=970212283> [Zugriff am 04.04.2007].
- Thomas, G., Goldberg, J. H., Cannon, D. J. & Hillis, S. L. (2002). Surface textures improve the robustness of stereoscopic depth cues. *Human Factors*, 44(1), 157-170.
- Tijerina, L., Johnston, S., Parmer, E., Winterbottom, M. D. & Goodman, M. (2000). *Driver distraction with wireless telecommunications and route guidance systems* (Technical Report Nr. DOT HS 809-069). Washington, DC: National Highway Traffic Safety Administration.
- Tittle, J. S., Woods, D. D., Roesler, A., Howard, M. & Phillips, F. (2001). The role of 2-D and 3-D task performance in the design and use of visual displays. In *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 45th Annual Meeting* (Bd. 1, S. 331-335). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Tönnis, M., Broy, V. & Klinker, G. (2006). A survey of challenges related to the design of 3D user interfaces for car drivers. In *Proceedings of the 3D User Interfaces (3DUI'06)* (S. 127 - 134). Washington, DC: IEEE Computer Society.
- Tory, M., Kirkpatrick, A. E., Atkins, M. S. & Möller, T. (2006). Visualization task performance with 2D, 3D, and combination displays. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 12(1), 2-13.
- Tufte, E. R. (1983). *The visual display of quantitative information*. Cheshire, CT: Graphics Press.
- Tullis, T. S. (1983). The formatting of alphanumeric displays: A review and analysis. *Human Factors*, 25(6), 657-682.
- Vainio, T. & Kotala, O. (2002). Developing 3D information systems for mobile users: Some usability issues. In *Proceedings of the Second Nordic Conference on Human-Computer Interaction* (S. 231 - 234). New York: ACM Press.
- Valyus, N. A. (1962). *Stereoscopy*. London: Focal Press.
- van der Meer, H. C. (1979). Interrelation of the effects of binocular disparity and perspective cues on judgements of depth and height. *Perception & Psychophysics*, 26, 481-488.

- van Orden, K. F. & Broyles, J. W. (2000). Visualspatial task performance as a function of two- and threedimensional display presentation techniques. *Displays*, 21(1), 17-24.
- Verwey, W. B. & Veltman, H. A. (1996). Detecting short periods of elevated workload: A comparison of nine workload assessment techniques. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2(3), 270-285.
- Vicente, K. J., Hayes, B. C. & Williges, R. C. (1987). Assaying and isolating individual differences in searching a hierarchical file system. *Human Factors*, 29(3), 349-359.
- Viswanathan, L. & Mingolla, E. (2002). Dynamics of attention in depth: Evidence from multi-element tracking. *Perception*, 31, 1415-1437.
- Wallach, H. & O'Connell, D. N. (1953). The kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*, 45(4), 205-217.
- Wann, J. P., Rushton, S. & Mon-Williams, M. (1995). Natural problems for stereoscopic depth perception in virtual environments. *Vision Research*, 35(19), 2731-2736.
- Ware, C. (2004). *Information visualization: Perception for design* (2. Aufl.). San Francisco, CA: Morgan Kaufmann.
- Ware, C. & Franck, G. (1996). Evaluating stereo and motion cues for visualizing information nets in three dimensions. *ACM Transactions on Graphics*, 15(2), 121-139.
- Wartenberg, C. & Wiborg, P. (2003). Precision of exocentric distance judgements in desktop and cube presentation. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 12(2), 196-206.
- Watanabe, M., Hirose, S. & Kishi, N. (1997, Oktober, 21-24 ). *Development of new bird's-eye view map display for navigation systems*. Paper presented at the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems: Mobility for Everyone, Berlin.
- Way, T. C. (1988). Stereopsis in cockpit display - a part-task test. In *Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the Human Factors Society* (S. 58-62). Santa Monica, CA: Human Factors Society.
- Weinberger, M., Winner, H. & Bubb, H. (2001). Adaptive cruise control field operational test-the learning phase. *JSAE Review*, 22(4), 487-494.
- Westerman, S. J. (1998). A comparison of the cognitive demands of navigating two- versus three-dimensional spatial database layouts. *Ergonomics*, 41(2), 207-212.

- Wickens, C. D. (1999). Frames of reference for navigation. In D. Gopher & A. Kariat (Hrsg.), *Attention and Performance XVII* (Bd. 16, S. 113-144). Cambridge, MA: MIT Press.
- Wickens, C. D. (2003). Aviation displays. In P. S. Tsang & M. A. Vidulich (Hrsg.), *Principles and practice of aviation psychology* (S. 147-200). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Wickens, C. D. & Carswell, C. M. (1995). The proximity compatibility principle: Its psychological foundation and relevance to display design. *Human Factors*, 37(3), 473-494.
- Wickens, C. D. & Hollands, J. G. (2000). *Engineering psychology and human performance* (3. Aufl.). New Jersey, NJ: Prentice Hall.
- Wickens, C. D., LaClair, M. & Sarno, K. (1995). Graph-task dependencies in three-dimensional data: Influence of three-dimensionality and color. In *Proceedings of the 39th Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Bd. 2, S. 1420-1424). Santa Monica, CA: Human Factors and Ergonomics Society.
- Wickens, C. D., Liang, C. C., Prevett, T. T. & Olmos, O. (1996). Electronic maps for terminal area navigation. *International Journal of Aviation Psychology*, 6(3), 241-271.
- Wickens, C. D. & Long, J. (1995). Object versus space-based models of visual attention: Implications for the design of head-up displays. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 1, 179-193.
- Wickens, C. D., Merwin, D. H. & Lin, E. L. (1994). Implications of graphics enhancements for the visualization of scientific data: Dimensional integrality, stereopsis, motion, and mesh. *Human Factors*, 36(1), 44-61.
- Wickens, C. D. & Prevett, T. T. (1995). Exploring the dimensions of egocentricity in aircraft navigation displays. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 1, 110-135.
- Wickens, C. D., Todd, S. & Seidler, K. (1989). *Three-dimensional displays: Perception, implementation, and applications* (Technischer Bericht Nr. CSERIAC SOAR-89-001). Dayton, OH: Armstrong Aerospace Medical Research Laboratory.
- Wiss, U., Carr, D. & Jonsson, H. (1998). Evaluating three-dimensional information visualization designs: A case study of three designs. In *Proceedings of International Conference on Information Visualization* (S. 137-144). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.

Woods, A., Docherty, T. & Koch, R. (1993). Image distortions in stereoscopic video systems. In *Proceedings of the SPIE - Stereoscopic Displays and Applications IV* (Bd. 1915, S. 36-48). San Jose, CA: International Society for Optical Engineering.

Woods, D. D. (1984). Visual momentum: A concept to improve the cognitive coupling of person and computer. *International Journal of Man-Machine Studies*, 21, 229-244.

Xiao, Y. & Milgram, P. (1992). Visualisation of large networks in 3-D space: Issues in implementation and experimental evaluation. In J. Botsford, et al. (Hrsg.), *Proceedings of the 1992 Conference of the Centre for Advanced Studies on Collaborative Research* (Bd. 1, S. 247 - 258). Toronto: IBM Press

Yeh, Y. & Silverstein, L. (1992). Spatial judgments with monoscopic and stereoscopic presentation of perspective displays. *Human Factors*, 34(5), 583-600.

Young, M. J., Landy, M. S. & Maloney, L. T. (1993). A perturbation analysis of depth perception from combinations of texture and motion cues. *Vision Research*, 33(18), 2685-2696.

Young, M. S. & Stanton, N. A. (2004). Taking the load off: Investigations of how adaptive cruise control affects mental workload. *Ergonomics*, 47(9), 1014-1035.

Zenyuh, J. P., Reising, J. M. & Walchli, S. (1988). A comparison of a stereographic 3-D display versus a 2-D display using an advanced air-to-air format. In *Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the Human Factors Society* (S. 53-57). Santa Monica, CA: Human Factors Society.

## Abkürzungsverzeichnis

### Verzeichnis allgemeiner Abkürzungen

2D	Zweidimensional, flächig
3D	Dreidimensional, räumlich
AAM	Alliance of Automobile Manufacturers (USA)
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control (= Abstandsregeltempomat)
AR	Augmented Reality
ART	Abstandsregeltempomat
ASD	Autostereoskopisches Display
CAD	Computer Aided Design
CD	Compact Disc
DBView	3D-Anzeigeprogramm, Eigenentwicklung der Daimler AG
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DVD	Digital Versatile Disc
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
E-Mail	Elektronische Post
FAS	Fahrerassistenzsystem(e)
HUD	Head-up Display
ISO	International Organization for Standardization
JAMA	Japan Automobile Manufacturers Association
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistant
POI	Point of Interest
SAE	Society of Automotive Engineers (USA)
SMS	Short Message Service
VR	Virtual Reality, Virtuelle Realität

**Verzeichnis spezifischer Abkürzungen in dieser Arbeit**

A	Je nach Zusammenhang Azimutwinkel, Abstand oder Aufgabe
Anz	Anzeige
AV	Abhängige Variable(n)
ASD	Displaybedingung mit autostereoskopischem Display
DEH	Displayeinheiten
DIS	Abweichung Distanzschätzung
FE	Fehler
H	Höhenwinkel
Mono	Displaybedingung mit konventionellem Display
P	Perspektive
RZ	Reaktionszeit
Shutter, Stereo	Displaybedingung mit stereoskopischer Shutterbrille
TK	Tiefenkriterien
x-Achse	Breite
y-Achse	Höhe
z-Achse	Tiefe

**Verzeichnis statistischer Kennwerte und Verfahren in dieser Arbeit**

<i>ANOVA</i>	Varianzanalyse (Analysis of Variance)
<i>df</i>	Freiheitsgrad
<i>F</i> -Wert	Testgröße der Varianzanalyse (ANOVA)
<i>M</i>	Mittelwert
<i>N</i>	Stichprobengröße
<i>n. s.</i>	nicht signifikant
<i>p</i>	Irrtumswahrscheinlichkeit
<i>SD</i>	Streuung
<i>t</i> -Wert	Testgröße im <i>t</i> -Test
<i>U</i> -Wert	Testgröße im Mann-Whitney-U-Test
<i>Z</i> -Wert	Testgröße im Wilcoxon-Test
$\varepsilon$	Korrekturfaktor nach Greenhouse & Geiser (1958) bei Verletzung der Sphärizitätsannahme in Varianzanalysen mit Messwiederholung
$\chi^2$ -Wert	Testgröße im $\chi^2$ -Test bzw. im Friedman-Test

## Anhang A – Experiment 1

**Tabelle A-1: Versuchsreize für Experiment 1**

Monokulare Tiefenkriterien	Quader	Hintergrund
<b><u>TK1:</u></b> Relative Größe und Höhe	<i>Farbe:</i> blau mit RGB 0/0/128 (16 cd/m <sup>2</sup> im Mittelpunkt der Szene) <i>Größe:</i> x = 68, y = 12, z = 1.5 DEH - nah: 8.2° x 1.4° - Mitte: 7.9° x 1.4° - fern: 7.6° x 1.3° <i>Abstand x-Achse:</i> 12 DEH, 1.4° im Mittelpunkt der Szene	<i>Farbe:</i> schwarz mit RGB 0/0/0 (0.1 cd/m <sup>2</sup> )
<b><u>TK2:</u></b> Relative Größe und Höhe Perspektive		<i>Ebene:</i> Breite vorn 27.7° und hinten 18.8°; hellgrau mit RGB 150/150/150 (21.0 cd/m <sup>2</sup> ) <i>Wand:</i> 18.8° x 18.8°; mittelgrau mit RGB 102/102/102 (8.4 cd/m <sup>2</sup> ) <i>Ebene, Wand:</i> 180 x 180 DEH
<b><u>TK3:</u></b> Relative Größe und Höhe Perspektive Textur		<i>Textur:</i> Schachbrettmuster aus 20 x 20 grauen Quadraten: <i>Ebene:</i> hellere mit RGB 126/126/126 (8.8 cd/m <sup>2</sup> ) und dunklere mit RGB 102/102/102 (3.8 cd/m <sup>2</sup> ) <i>Wand:</i> hellere mit RGB 85/85/85 (3.9 cd/m <sup>2</sup> ) und dunklere mit RGB 66/66/66 (0.7 cd/m <sup>2</sup> )
<b><u>TK4:</u></b> Relative Größe und Höhe Perspektive Textur Verdeckung	<i>Überlappung x-Achse:</i> 1.1° im Mittelpunkt der Szene (10 DEH)	

Anmerkungen: TK = Tiefenkriterien; DEH = Displayeinheiten.

**Tabelle A-2: Disparitäten für Experiment 1**

Abstand	Tiefe <sup>a</sup>	Autostereoskopisches Display			Shutterbrille		
		Disparität <sup>b</sup> in cm	Disparität <sup>c</sup> in Bogenminuten	Tiefenwirkung <sup>c</sup> in cm	Disparität <sup>b</sup> in cm	Disparität <sup>c</sup> in Bogenminuten	Tiefenwirkung <sup>c</sup> in cm
<b>Abstand 1</b>	05 DEH	0.01	0.8	0.16	0.02	1.1	0.25
<b>Abstand 4</b>	20 DEH	0.06	3.1	0.70	0.09	4.5	1.02
<b>Abstand 6</b>	30 DEH	0.09	4.6	1.04	0.14	6.7	1.52

Anmerkungen: Stereokameraabstand = 2.08 Displayeinheiten; Stereokamerawinkel = 0.98°.

<sup>a</sup> Abstand in z-Richtung in Displayeinheiten (DEH).

<sup>b</sup> Die Disparität in cm wurde mit Hilfe eines Pixellineals in den Anzeigen gemessen.

<sup>c</sup> Die Disparität in Bogenminuten und die Tiefenwirkung in cm wurden berechnet (s. Abschn. 5.4.3).

**Tabelle A-3: Ergebnisse Faktor Abstand für Experiment 1**

AV	Faktor <i>Abstand</i>						
	A0	A1	A2	A3	A4	A5	A6
	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>
<b>RZ ms</b>	1009 (281)	950 (216)	788 (175)	751 (163)	739 (168)	734 (161)	738 (163)
<b>FE<sup>a</sup> %</b>	7.6 (5.6)	4.7 (4.2)	1.7 (3.2)	1.5 (2.6)	1.3 (3.0)	0.9 (2.4)	1.3 (2.8)
AV	Faktor <i>Abstand</i> (Fortsetzung)						
	ANOVA	A0 vs. A1	A1 vs. A2	A2 vs. A3	A3 vs. A4		
	<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> ) $\epsilon$	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )		
<b>RZ ms</b>	75.61*** (6, 138) 0.24	2.13* (23)	12.14*** (23)	7.98*** (23)	3.17*** (23)		
<b>FE<sup>a</sup> %</b>	25.20*** (6, 138) 0.33	-2.16* (23)	-4.09*** (23)	<i>n. s.</i> (23)	<i>n. s.</i> (23)		

Anmerkungen: AV = Abhängige Variablen; RZ = Reaktionszeit; FE = Fehler; A = Abstand. Zwischen den Abständen 4 und 5, sowie 5 und 6 gab es keine signifikanten Unterschiede. Signifikante Wechselwirkungen der Faktoren *Abstand* x *Display* sind im Text vermerkt.

<sup>a</sup> Die statistischen Analysen wurden mit den arcsin-transformierten Fehlerprozenten gerechnet (s. Abschn. 7.3).

<sup>°</sup>  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ ; *n.s.* = nicht signifikant.



**Tabelle A-4: Ergebnisse Faktor *monokulare Tiefenkriterien* für Exp. 1**

AV	Faktor <i>monokulare Tiefenkriterien</i>				ANOVA	TK1 vs. TK2	TK2 vs. TK3	TK3 vs. TK4
	TK1	TK2	TK3	TK4				
	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> ) $\varepsilon$	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )
<b>RZ ms</b>	868 (196)	811 (193)	817 (190)	766 (168)	31.69*** (3, 69) 0.68	4.87*** (23)	-0.78 (23)	6.93*** (23)
<b>FE<sup>a</sup> %</b>	5.4 (5.8)	3.1 (4.4)	2.5 (3.0)	1.4 (1.8)	7.87*** (3, 69) 0.59	-2.5* (23)	-1.1 (23)	-2.5* (23)
<b>Wechselwirkung Faktoren <i>monokulare Tiefenkriterien</i> x <i>Display</i></b>								
<b>Mono</b>	902 (319)	772 (266)	752 (215)	704 (196)	8.46*** (6, 138) 0.32	RZ ms		
<b>Shut- ter</b>	809 (176)	762 (183)	801 (219)	740 (183)				
<b>ASD</b>	893 (154)	899 (173)	897 (171)	855 (163)				
<b><i>t</i><sub>MS</sub> (<i>df</i>)</b>	2.24* (23)	0.22 (23)	-2.23* (23)	-1.76° (23)				
<b>Mono</b>	9.1 (14.8)	5.0 (12.9)	3.3 (7.6)	1.1 (2.2)	3.12* (6, 138) 0.42	FE <sup>a</sup> %		
<b>Shut- ter</b>	3.0 (4.2)	1.8 (2.2)	2.0 (2.4)	0.7 (1.3)				
<b>ASD</b>	4.0 (4.0)	2.6 (3.3)	2.2 (2.6)	2.2 (3.1)				
<b><i>t</i><sub>MS</sub> (<i>df</i>)</b>	-1.94° (23)	-1.14 (23)	-0.79 (23)	-0.94 (23)				

Anmerkungen: AV = Abhängige Variablen; RZ = Reaktionszeit; FE = Fehler; TK = Tiefenkriterien; Mono = Monoskopisches Display; Shutter = Shutterbrille; ASD = Autostereoskopisches Display.

$t_{MS}$  = *t*-Wert für den Vergleich der Displaybedingungen Mono und Shutter.

<sup>a</sup> Die statistischen Analysen wurden mit den arcsin-transformierten Fehlerprozenten gerechnet (s. Abschn. 7.3).

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle A-5: Ergebnisse Faktor *Display* für Experiment 1**

AV	Faktor <i>Display</i>			ANOVA	Mono vs. Shutter	Shutter vs. ASD	Mono vs. ASD
	Mono	Shutter	ASD				
	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>				
				<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> ) $\varepsilon$	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )
<b>RZ ms</b>	783 (240)	778 (186)	886 (160)	11.38*** (2, 46) 0.78	0.19 (23)	-5.38*** (23)	-3.30** (23)
<b>FE<sup>a</sup> %</b>	4.6 (8.3)	1.9 (2.0)	2.8 (3.1)	2.55 (2, 46) 0.57	-1.78° (23)	1.77° (23)	-0.65 (23)

Anmerkungen: AV = Abhängige Variablen; RZ = Reaktionszeit; FE = Fehler; Mono = Monoskopisches Display; Shutter = Shutterbrille; ASD = Autostereoskopisches Display. Die Ergebnisse zur Wechselwirkung der Faktoren *monokulare Tiefenkriterien* x *Display* finden sich in Tabelle A-4.

<sup>a</sup> Die statistischen Analysen wurden mit den arcsin-transformierten Fehlerprozenten gerechnet.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

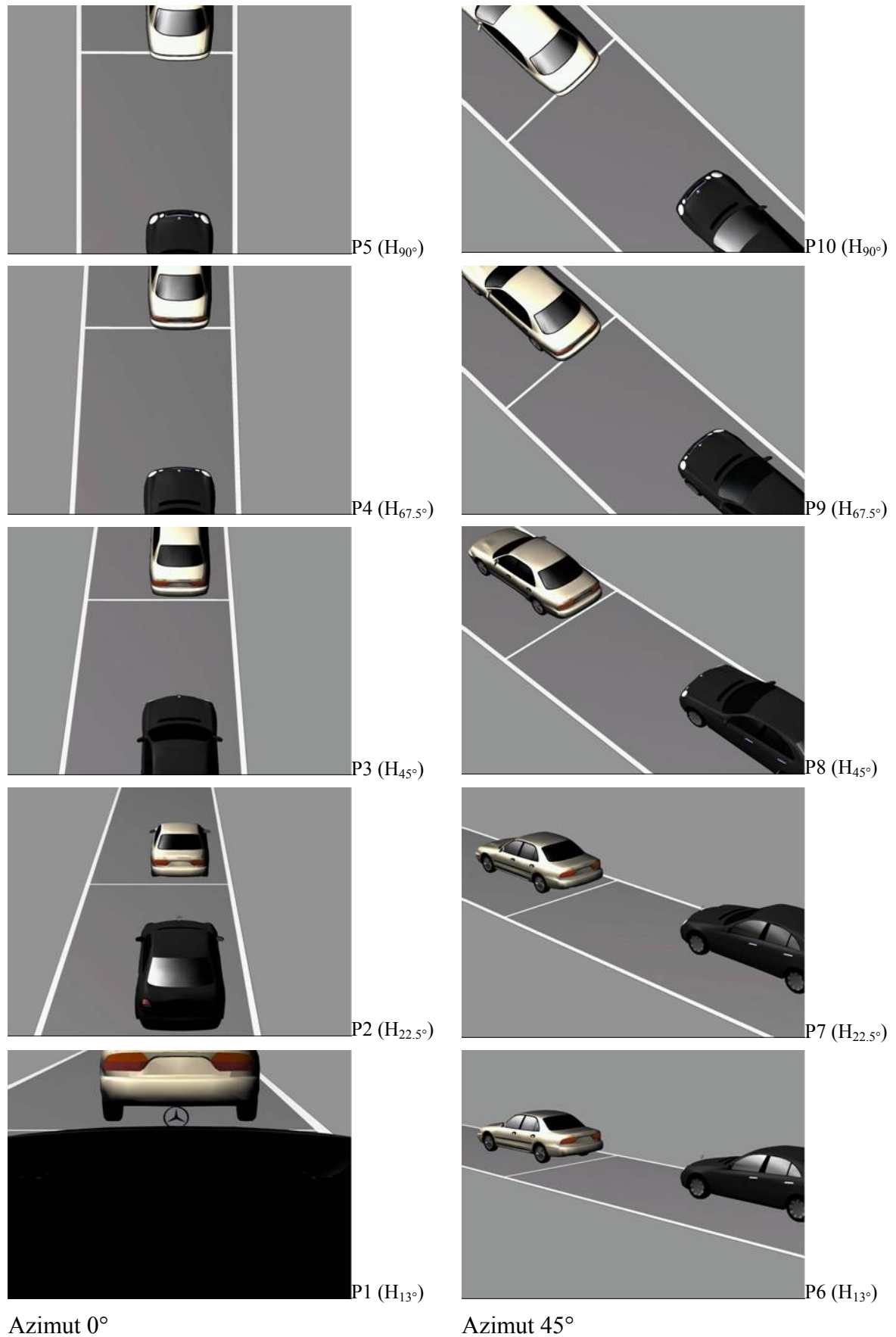
**Tabelle A-6: Ergebnisse Faktor *Blickwechsel* für Experiment 1**

Abhängige Variablen		Faktor <i>Blickwechsel</i>		ANOVA	
		ohne	mit		
		<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> )	
RZ in ms		792 (157)	840 (160)	5.96* (1, 23)	
Wechselwirkung Faktoren <i>Blickwechsel</i> x <i>Display</i>					
RZ in ms		Faktor <i>Blickwechsel</i>		ohne vs. mit	ANOVA
		ohne	mit		
		<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> )
	Mono	765 (220)	800 (275)	1.34 (23)	0.43 (2, 46) $\varepsilon = 0.69$
	Shutter	750 (149)	806 (234)	2.21* (23)	
	ASD	861 (242)	912 (187)	2.85** (23)	

Anmerkungen: RZ = Reaktionszeit; Mono = Monoskopisches Display; Shutter = Shutterbrille; ASD = Autostereoskopisches Display.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

## Anhang B – Experiment 2



Azimut 0°

Azimut 45°

**Abbildung B-1: Perspektiven für Experiment 2**

**Tabelle B-1: Disparitäten für Experiment 2**

Perspektive	Stereo-kamera-abstand	Stereo-kamera-winkel	maxi-male Tiefe <sup>a</sup>	Dispari-tät <sup>b</sup> in cm	Dispari-tät <sup>c</sup> in Bogen-minuten	Tiefen-wir-kung <sup>c</sup> in cm
P1 (A0°, H13°)	1.0	2.4°	33	0.59	29.1	7.13
P2 (A0°, H22.5°)	2.6	1.2°	74	1.33	65.2	18.32
P3 (A0°, H45°)	6.0	2.4°	29	0.52	25.6	6.20
P4 (A0°, H67.5°)	7.4	2.6°	16	0.29	14.1	3.29
P5 (A0°, H90°)	8.0	2.7°	4	0.07	3.5	0.79
P6 (A45°, H13°)	4.2	1.7°	48	0.86	42.3	10.89
P7 (A45°, H22.5°)	4.2	1.7°	47	0.84	41.4	10.63
P8 (A45°, H45°)	5.0	1.9°	31	0.56	27.3	6.66
P9 (A45°, H67.5°)	6.5	2.3°	16	0.29	14.1	3.29
P10 (A45°, H90°)	7.5	2.5°	4	0.07	3.5	0.79

Anmerkungen: P = Perspektive; A = Azimutwinkel; H = Höhenwinkel.

<sup>a</sup> Distanz zwischen dem am nächsten und am weitesten von der Position der virtuellen Kamera entfernten Objekt in Displayeinheiten.

<sup>b</sup> Die Disparität in cm wurde mit Hilfe eines Pixellineals in den Anzeigen gemessen.

<sup>c</sup> Die Disparität in Bogenminuten und die Tiefenwirkung in cm wurden berechnet (s. Abschn. 5.4.3).

**Tabelle B-2: Zu schätzende Distanzen für Experiment 2**

Distanz (D)	Displayeinheiten (0 = minimal bis 100 = maximal)	Anzahl der sichtbaren Segmente
D1	93	5
D2	82	4
D3	78	4
D4	62	3
D5	53	3
D6	42	2
D7	36	2
D8	24	1
D9	20	1
D10	9	0

**Tabelle B-3: Ergebnisse Faktor *Höhenwinkel* für Experiment 2**

AV	Faktor <i>Höhenwinkel</i>					ANO- VA	H13°	H22.5°	H45°	H67.5°
	H13°	H22.5°	H45°	H67.5°	H90°		vs. H22.5°	vs. H45°	vs. H67.5°	vs. H90°
	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )		<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> ) <i>ε</i>	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )
RZ ms	1329 (450)	1193 (374)	1134 (364)	1104 (336)	1146 (372)	16.0*** (4, 56) 0.40	4.0*** (14)	2.9° (14)	1.7 (14)	-2.7 (14)
DIS %	12.2 (2.2)	11.3 (1.6)	9.8 (0.9)	8.7 (1.4)	7.8 (1.7)	31.3*** (4, 56) 0.54	1.7° (14)	4.8*** (14)	4.4*** (14)	4.3*** (14)
Wechselwirkung Faktoren <i>Höhenwinkel</i> x <i>Azımut</i>										
A0°	1450 (484)	1179 (362)	1121 (344)	1092 (327)	1144 (395)	14.1*** (4, 56)	RZ ms			
A45°	1209 (431)	1207 (400)	1146 (390)	1115 (353)	1148 (358)					
<i>t</i> ( <i>df</i> )	5.4*** (14)	-0.7 (14)	-0.9 (14)	-0.8 (14)	-0.1 (14)					
A0°	13.7 (3.8)	12.4 (1.7)	9.8 (1.2)	8.8 (1.6)	7.7 (1.8)	6.5** (4, 56)	DIS %			
A45°	10.6 (2.1)	10.3 (1.6)	9.8 (1.1)	8.6 (1.3)	7.8 (1.8)					
<i>t</i> ( <i>df</i> )	2.8* (14)	6.7*** (14)	0.1 (14)	0.7 (14)	-0.3 (14)					
Wechselwirkung Faktoren <i>Höhenwinkel</i> x <i>Segmente</i>										
S <sub>ohne</sub>	1318 (500)	1200 (382)	1100 (370)	1075 (349)	1111 (380)	1.8 (4, 56)	RZ ms			
S <sub>mit</sub>	1340 (444)	1185 (389)	1167 (399)	1132 (351)	1180 (401)					
<i>t</i> ( <i>df</i> )	-0.3 (14)	0.3 (14)	-1.0 (14)	-1.1 (14)	-1.1 (14)					
S <sub>ohne</sub>	15.1 (3.3)	14.2 (3.5)	11.6 (2.9)	9.9 (2.9)	8.3 (2.7)	11.8*** (4, 56)	DIS %			
S <sub>mit</sub>	9.33 (2.2)	8.40 (2.6)	8.02 (2.7)	7.45 (2.6)	7.26 (2.6)					
<i>t</i> ( <i>df</i> )	6.3*** (14)	4.3** (14)	2.6* (14)	2.0° (14)	1.0 (14)					

Anmerkungen: AV = Abhängige Variablen; RZ = Reaktionszeit; DIS = Abweichung der Distanzschätzung; H = Höhenwinkel; A = Azimetwinkel; S = Segmente.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle B-4: Ergebnisse Faktor *Azimet* für Experiment 2**

Abhängige Variablen	Faktor <i>Azimet</i>		ANOVA
	A0°	A45°	
	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>F-Wert (df)</i>
<b>RZ ms</b>	1197 (369)	1165 (381)	2.56 (1, 14)
<b>DIS %</b>	10.5 (1.4)	9.4 (1.1)	17.56*** (1, 14)

Anmerkungen: RZ = Reaktionszeit; DIS = Abweichung der Distanzschätzung; A = Azimetwinkel.

Die Ergebnisse zur Wechselwirkung der Faktoren *Azimet* x *Höhenwinkel* sind in Tabelle B-3 aufgeführt.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle B-5: Ergebnisse Faktor *Display* für Experiment 2**

Abhängige Variablen		Faktor <i>Display</i>		ANOVA
		Mono	Stereo	
		<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>F-Wert (df)</i>
RZ ms		1158 (329)	1204 (430)	1.01 (1, 14)
DIS %		10.2 (1.3)	9.7 (1.3)	3.45° (1, 14)
Wechselwirkung Faktoren <i>Display</i> x <i>Segmente</i>				
RZ ms	Sohne	1148 (339)	1174 (453)	0.34 (1, 14)
	Smit	1169 (345)	1233 (460)	
DIS %	Sohne	12.6 (2.7)	11.1 (2.4)	9.37** (1, 14)
	Smit	7.9 (2.4)	8.3 (2.5)	
Wechselwirkung Faktoren <i>Display</i> x <i>Höhenwinkel</i> x <i>Azimet</i>				
RZ ms	P <sub>kleinere Auflösung</sub>	1239 (371)	1282 (313)	D x H x A: 1.23 (4, 56) <sup>a</sup> D x H: 0.57 (4, 56) <sup>a</sup> D x A: 0.71 (4, 56) <sup>a</sup>
	P <sub>größere Auflösung</sub>	1105 (471)	1151 (407)	
DIS %	P <sub>kleinere Auflösung</sub>	12.1 (2.2)	11.4 (1.5)	D x H x A: 0.37 (4, 56) <sup>a</sup> D x H: 1.04 (4, 56) <sup>a</sup> D x A: 3.14° (4, 56) <sup>a</sup>
	P <sub>größere Auflösung</sub>	9.0 (1.1)	8.5 (1.5)	

Anmerkungen: RZ = Reaktionszeit; DIS = Abweichung der Distanzschätzung; Mono =

Monoskopisches Display; Stereo = Stereoskopisches Display mit Shutterbrille;

S = Segmente; P = Perspektive; H = Höhenwinkel; A = Azimetwinkel; D = Display.

<sup>a</sup> Die Wechselwirkung wurde anhand der einzelnen Höhen- und Azimetwinkel statistisch überprüft. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind sowohl über die Perspektiven mit kleinerer Auflösung (P1, P2, P6, P7) als auch über die Perspektiven mit größerer Auflösung (P3, P4, P5, P8, P9, P10) gemittelt aufgeführt.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle B-6: Ergebnisse Faktor *Segmente* für Experiment 2**

Abhängige Variablen		Faktor <i>Segmente</i>		ANOVA
		S <sub>ohne</sub>	S <sub>mit</sub>	
		<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>F-Wert (df)</i>
RZ ms		1160 (387)	1201 (391)	0.51 (1, 14)
DIS %		11.8 (2.4)	8.1 (2.4)	12.09** (1, 14)
Wechselwirkung Faktoren <i>Segmente</i> x <i>Höhenwinkel</i> x <i>Azimet</i>				
RZ ms	P <sub>kleinere Auflösung</sub>	1259 (437)	1263 (413)	1.02 (4, 56) <sup>a</sup>
	P <sub>größere Auflösung</sub>	1096 (363)	1160 (381)	
DIS %	P <sub>kleinere Auflösung</sub>	14.6 (2.7)	8.9 (2.3)	3.07* (4, 56) <sup>a</sup>
	P <sub>größere Auflösung</sub>	9.9 (2.7)	7.6 (2.5)	
Wechselwirkung Faktoren <i>Segmente</i> x <i>Azimet</i>				
RZ ms	A0°	1169 (370)	1225 (404)	0.94 (1, 14)
	A45°	1153 (409)	1177 (384)	
DIS %	A0°	12.5 (2.3)	8.5 (2.5)	1.86 (1, 14)
	A45°	11.1 (2.6)	7.7 (2.3)	

Anmerkungen: RZ = Reaktionszeit; DIS = Abweichung der Distanzschätzung;  
S = Segmente; P = Perspektive; A = Azimutwinkel.

<sup>a</sup>Die Wechselwirkung wurde anhand der einzelnen Höhen- und Azimutwinkel statistisch überprüft. Die Mittelwerte und Standardabweichungen sind sowohl über die Perspektiven mit kleinerer Auflösung (P1, P2, P6, P7) als auch über die Perspektiven mit größerer Auflösung (P3, P4, P5, P8, P9, P10) gemittelt aufgeführt.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle B-7: Ergebnisse subjektive Bewertung Höhenwinkel für Exp. 2**

AV	Faktor <i>Höhenwinkel</i>				
	H13°	H22.5°	H45°	H67.5°	H90°
	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>
Attr in RP	8.8 (1.1)	5.5 (1.3)	4.0 (0.9)	4.0 (1.1)	5.3 (1.6)
Nütz in RP	9.0 (0.6)	7.4 (0.8)	5.0 (0.7)	3.5 (0.7)	2.6 (0.8)
AV	Faktor <i>Höhenwinkel</i> (Fortsetzung)				
	Friedmann-Test	H13° vs. H22.5°	H22.5° vs. H45°	H45° vs. H67.5°	H67.5° vs. H90°
	$\chi^2$ -Wert ( <i>df</i> , <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )
Attr in RP	37.10*** (4, N=15)	-3.52*** (15)	-3.18** (15)	-0.41 (15)	-2.39* (15)
Nütz in RP	59.71*** (4, N=15)	-3.45** (15)	-3.43** (15)	-3.38** (15)	-2.54* (15)

Anmerkungen: AV = Abhängige Variablen; Attr = Attraktivität; Nütz = Nützlichkeit; RP = mittlerer Rangplatz;

Z-Wert = Testgröße im Wilcoxon-Test.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle B-8: Ergebnisse subjektive Bewertung *Azimet* für Experiment 2**

Abhängige Variablen	Faktor <i>Azimet</i>		Wilcoxon-Test
	A0°	A45°	
	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	Z-Wert ( <i>N</i> )
Attraktivität in mittleren Rangplätzen	6.3 (1.3)	4.7 (1.3)	-2.23* (15)
Nützlichkeit in mittleren Rangplätzen	5.5 (1.0)	5.6 (1.0)	-0.83 (15)

Anmerkungen: A= Azimetwinkel.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle B-9: Ergebnisse subjektive Bewertung *Display* für Experiment 2**

Bestes Display =>	Mono	Stereo	$\chi^2$ -Test
			$\chi^2$ -Wert ( <i>df</i> , <i>N</i> )
Attraktivität (Häufigkeit der Nennungen)	4	11	13.4** (1, 15)
Nützlichkeit (Häufigkeit der Nennungen)	8	7	3.8 (1, 15)

Anmerkungen: Mono = Monoskopisches Display; Stereo = Stereoskopisches Display mit Shutterbrille.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .



**Tabelle B-10: Instruktionen zur subjektiven Bewertung der Perspektiven**

<b><i>Attraktivität</i></b>	Die vor Ihnen liegenden zehn Anzeigen kennen sie bereits aus dem Versuchsteil. Sie unterscheiden sich bezüglich des Blickwinkels auf die Szene. Bitte bewerten Sie die Bilder bezüglich ihrer Attraktivität (Schönheit, Ästhetik) und bringen Sie diese in eine Rangfolge, so dass das am wenigsten attraktive Bild ganz unten liegt und die übrigen mit zunehmender Attraktivität darüber liegen.
<b><i>Nützlichkeit für Distanzschätzung</i></b>	Nun bitte ich Sie, die zehn Anzeigen noch ein weiteres Mal zu sortieren. Diesmal ist das Kriterium Ihrer Einschätzung, in welchem Bild Ihnen die Schätzung der Distanzen am leichtesten gefallen ist. Bitte legen Sie das Bild, mit welchem die Distanzschätzung am schwierigsten war, nach unten.

**Tabelle B-11: Instruktion zur subjektiven Bewertung der Displays**

<b><i>Attraktivität:</i></b>	Welche Art der 3D-Anzeigen fanden Sie attraktiver (schöner, ästhetischer), die auf dem normalen Bildschirm oder die mit Shutterbrille?
<b><i>Nützlichkeit für Distanzschätzung:</i></b>	Mit welcher Art der 3D-Anzeigen ist Ihnen die Schätzung der Distanzen leichter gefallen, mit dem normalen Bildschirm oder mit der Shutterbrille?



## Anhang C – Experiment 3

**Tabelle C-1: Graphische Details der Anzeigen für Experiment 3**

Anzeige =>	2D-Anzeige	3D-Anzeigen
<b>Perspektive</b>	Seitenansicht	Azimutwinkel: 0° Höhenwinkel: 15°, 22.5° und 45°
<b>Farbigkeit</b>	Schwarz-weiß	Farbig (16 bit)
<b>Tiefenkriterien</b>	Keine	Perspektive, Helligkeitsverläufe an Objekten, Textur Strasse, Schatten unter 3D-Objekten, Verdeckung
<b>Position im Kombiinstrument</b>	Mittig im Tacho	Rechts neben Tacho
<b>Größe der Anzeige</b>	287 x 287 Pixel	736 x 552 Pixel
<b>Schriftgröße</b>	17 Pixel	22 Pixel

**Tabelle C-2: Geometrische Parameter für Experiment 3**

Höhenwinkel =>	15°	22.5°	45°
<b>Azimutwinkel</b>	0°		
<b>Vertikaler Kameraöffnungswinkel</b>	41°	30°	40°
<b>Distanz Kamera zu Bildmittelpunkt</b>	29.3 DEH	65 DEH	86 DEH
<b>Position Bildmittelpunkt (x; y; z)</b>	0; 0; 30	0; 0; 35	- <sup>a</sup>
<b>Kameraposition (x; y; z)</b>	0; 7.39; 1.63	0; 25; -25	- <sup>a</sup>
<b>Position Mitte eigenes Fahrzeug (x; y; z)</b>	0; 0; 0		
<b>Position vordere Stoßstange eig. Fzg. (z)</b>	-10		
<b>Länge Fahrzeug (ca. 5 m)</b>	20 DEH		
<b>max. Abstand zw. den Fahrzeugen (150 m)</b>	80 DEH		

Anmerkung: DEH = Displayeinheiten.

<sup>a</sup> Diese Informationen waren nach einem Datenverlust nicht mehr reproduzierbar.

**Tabelle C-3: Daten zur Nutzung des Abstandsregeltempomaten für Experiment 3**

Anzeigen =>	2D-Anz.	3D-Anz.	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )
Dauer ART ein in s	670.0	676.7	<i>n. s.</i>
Häufigkeit ART ein	4.2	3.6	<i>n. s.</i>
Häufigkeit Veränderung Wunschgeschwindigkeit	12.3	9.0	2.04* (29)
Häufigkeit Warnung	0.3	0.3	<i>n. s.</i>
Häufigkeit Veränderung Wunschabstand	3.2	5.4	-2.44* (29)
Mittelwert Wunschabstand in s	1.52	1.47	<i>n. s.</i>
Häufigkeit ART passiv	9.4	10.1	<i>n. s.</i>
Dauer ART passiv in s	56.0	65.5	<i>n. s.</i>
Dauer ART ein mit vorausfahrendem Fahrzeug in s	482.0	473.2	<i>n. s.</i>
Häufigkeit Bremsen durch ART	22.1	22.8	<i>n. s.</i>
Bremsdauer durch ART in s	122.3	108.6	<i>n. s.</i>

Anmerkungen: ART = Abstandsregeltempomat; Anz. = Anzeige

Die Auswertung erfolgte über die gesamte Dauer einer Versuchsfahrt (ca. 15 min). Da es keine signifikanten Unterschiede zwischen den Höhenwinkeln 15° und 22.5° gab, sind diese hier zusammen aufgeführt.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ ; *n.s.* = nicht signifikant.

**Tabelle C-4: Ergebnisse zum unmittelbaren Verständnis für Experiment 3**

Abhängige Variablen	Unabhängige Variablen				2D vs. 3D	H15° vs. H22.5°
	Dimensionalität		Höhenwinkel			
	2D	3D	H15°	H22.5°		
	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )
Hilfen zur Bedienung (Häufigkeiten)	0.43 (0.77)	0.27 (0.52)	-a	-a	1.22 (29)	-a
Unmittelbare Verständlichkeit (Häufigkeiten richtig und teilweise richtig; max. 14)	8.0 (2.35)	10.0 (2.63)	-a	-a	-2.18* (25)	-a
Subjektive Bewertung der Verständlichkeit (1-5; 1 = verständlich)	2.77 (1.01)	2.20 (1.00)	-a	-a	2.25* (29)	-a

Anmerkungen: H = Höhenwinkel.

<sup>a</sup> Zu Unterschieden zwischen den Höhenwinkeln wurden keine Hypothesen aufgestellt und überprüft.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ ; *n.s.* = nicht signifikant.

**Tabelle C-5: Ergebnisse zur Akzeptanz für Experiment 3**

Abhängige Variablen		Unabhängige Variablen				2D vs. 3D	H15° vs. H22.5°
		Dimensionalität		Höhenwinkel			
		2D	3D	H15°	H22.5°		
		<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>	<i>M (SD)</i>		
Akzeptanzskalen	Akzeptanz <sup>a</sup>	3.34 (0.70)	3.98 (0.77)	3.83 (0.93)	4.13 (0.56)	3.86** (29)	-1.07 (28)
	Einstellung <sup>a</sup>	4.01 (0.77)	4.14 (0.56)	3.92 (0.64)	4.36 (0.38)	0.91 (29)	-2.29* (28)
	Ablehnung <sup>a</sup>	1.55 (1.05)	1.37 (0.71)	1.60 (0.93)	1.13 (0.29)	-1.30 (29)	1.88 °(28) (p=.078)
	Soziale Norm <sup>a</sup>	3.38 (1.32)	3.52 (1.31)	3.47 (1.25)	3.57 (1.41)	0.76 (29)	-0.21 (28)
	Interesse <sup>a</sup>	2.98 (0.85)	2.55 (0.84)	2.57 (0.89)	2.53 (0.82)	-3.01* (29)	0.14 (28)
Akzeptanz- ursachen	Ästhetik <sup>b</sup>	6.33 (2.51)	7.57 (1.74)	6.67 (1.72)	8.47 (1.25)	1.97° (29) (p=.058)	-3.28** (28)
	Funktionalität <sup>b</sup>	7.13 (2.22)	8.07 (1.11)	7.73 (0.96)	8.40 (1.18)	2.10* (29)	-1.69 (28)
	Qualität <sup>b</sup>	7.2 (2.06)	8.07 (1.51)	7.66 (1.72)	8.47 (1.19)	1.88° (29) (p=.068)	-1.48 (28)

Anmerkungen: H = Höhenwinkel.

<sup>a</sup> Skala 1-5 mit 5 = Kriterium sehr stark ausgeprägt.<sup>b</sup> Skala 1-10 mit 10 = Kriterium sehr stark ausgeprägt.° *p* < .1; \* *p* < .05; \*\* *p* < .01; \*\*\* *p* < .001; *n.s.* = nicht signifikant.**Tabelle C-6: Ergebnisse zur subjektiven Bewertung der Perspektiven Experiment 3**

Besten Höhenwinkel	15°	22.5°	45°	alle gleich	$\chi^2$ -Wert ( <i>df</i> , <i>N</i> ) <sup>b</sup>
Attraktivität <sup>a</sup>	9	16	5	0	6.2* (2, 30)
Distanzschätzung <sup>a</sup>	6	10	10	2	6.29° (3, 28), <i>p</i> = .099
Abgleich <sup>a</sup>	13	11	4	0	4.79° (2, 28), <i>p</i> = .091
Insgesamt geeignet für Fahrzeug <sup>a</sup>	7	17	5	0	18.53*** (3, 30)

Anmerkungen: <sup>a</sup> Häufigkeit der Nennungen.<sup>b</sup>  $\chi^2$ -Test.° *p* < .1; \* *p* < .05; \*\* *p* < .01; \*\*\* *p* < .001.

### Protokollbogen zur Erfassung des unmittelbaren Verständnisses für Exp.3

Fragen	Ant- wort	k. A.	rich- tig	teilw. rich- tig	falsch
<b>Film 1:</b> Kurzes Video der Anzeige des Abstandsregeltempomaten ( <i>1mal zeigen</i> ).					
UV1a: Welches System könnte sich hinter dieser Anzeige verbergen? Welche Funktionalität könnte es haben?					
UV1b: Woran erinnert Sie die Anzeige ansonsten?					
<b>Kurze Instruktion zum Abstandsregeltempomaten:</b> „Es handelt sich hier um das Fahrerassistenzsystem DISTRONIC. Es hält eine von Ihnen eingestellte Geschwindigkeit konstant. Diese Funktionalität kennen Sie vielleicht vom Tempomaten. Außerdem regelt es automatisch den Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug, indem es selbstständig bremsst oder beschleunigt.“					
<b>Screenshot 1:</b> „Hier sehen Sie ein Beispiel der Anzeige der DISTRONIC. Was könnte sich hinter folgenden Elementen verbergen?“ ( <i>Versuchsleiterin zeigt auf einzelne Elemente der Anzeige</i> )					
UV2: Eigenes Fahrzeug					
UV3: Vorausfahrendes Fahrzeug					
UV4: Abstand zwischen den Fahrzeugen					
UV5: Wunschabstand					
UV6: Wunschgeschwindigkeit (analog)					
UV7: Wunschgeschwindigkeit (digital)					
UV8: Geschwindigkeit vorausfahrendes Fahrzeug					
<b>Screenshot 2:</b> Warnmeldung des Abstandsregeltempomaten					
UV9: Was könnte diese Anzeige bedeuten?					
UV10: Wie würden Sie auf diese Anzeige reagieren?					
<b>Filme 2-5:</b> „Im Folgenden zeigen wir Ihnen verschiedene Beispielfilme der DISTRONIC-Anzeigen. Was könnte es Ihrer Meinung nach bedeuten, wenn sich folgende Veränderungen in den Anzeigen ergeben?“ ( <i>mindestens 2mal zeigen, auf Wunsch auch öfter</i> )					
UV11: Wunschabstand verändert sich					
UV12: Tacho: Wunschgeschwindigkeit verändert sich					
UV13: Tacho: Geschwindigkeit vorausfahrendes Fahrzeug verändert sich					
UV14a: Wunschabstand verringert sich bis Warnmeldung kommt.					
UV14b: Wie würden Sie auf diese Anzeige reagieren?					
<b>Subjektive Bewertung der Verständlichkeit</b>					
Wie verständlich finden Sie die Anzeige ohne das System bisher gefahren zu sein?	verständlich (1) <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> (5) verwirrend				

Anmerkung: DISTRONIC = Abstandsregeltempomat.

## Protokollbogen zur Datenerfassung während der Versuchsfahrt für Exp. 3

Übungsaufgaben	Hilfe durch Versuchsleiterin
ÜA1: DISTRONIC einschalten durch Hebel nach oben	<input type="checkbox"/> ja
ÜA2: Mit DISTRONIC fahren, Fuß vom Gas	<input type="checkbox"/> ja
ÜA3: Wunschgeschwindigkeit verändern durch Hebel rauf/runter bis i.O.	<input type="checkbox"/> ja
ÜA4: Geregelt fahren, Fuß vom Gas	<input type="checkbox"/> ja
ÜA5: Wunschabstand erhöhen: Rändelrad Richtung Rückbank bis Maximum	<input type="checkbox"/> ja
ÜA6: Wunschabstand senken: Rändelrad Richtung Windschutz bis Minimum	<input type="checkbox"/> ja
ÜA7: Mittleren Abstand einstellen	<input type="checkbox"/> ja
ÜA8: DISTRONIC aus durch sanftes Bremsen	<input type="checkbox"/> ja
ÜA9: DISTRONIC ein durch Hebel zu sich heranziehen	<input type="checkbox"/> ja
ÜA10: Wunschgeschwindigkeit verändern durch Hebel hoch/runter bis i.O.	<input type="checkbox"/> ja
ÜA11: Wunschgeschwindigkeit um 10km/h verringern durch Hebel runter	<input type="checkbox"/> ja
ÜA12: Wunschgeschwindigkeit um 5km/h erhöhen durch Hebel 5 mal heranziehen	<input type="checkbox"/> ja
ÜA13: DISTRONIC passiv durch sanftes Beschleunigen	<input type="checkbox"/> ja
ÜA14: Geregelt fahren, Fuß vom Gas	<input type="checkbox"/> ja
ÜA15: DISTRONIC ausschalten durch Wegdrücken des Hebels	<input type="checkbox"/> ja
Warnmeldungen:	
Kommentare Proband:	
Bemerkungen Versuchsleiterin (Störung System, Stau, Regen usw.):	
<b>Freie Fahrt: (ca. 15 min), Szenario:</b> Fahrzeug gerade in Kundencenter übernommen und DISTRONIC erklärt bekommen. Selbst und in Ruhe ausprobieren. So schnell fahren wie angenehm, ohne Beeinträchtigung des nachfolgenden Verkehrs. DISTRONIC so viel wie möglich in geeigneten Verkehrssituationen einsetzen. Verschiedene Funktionen der DISTRONIC verwenden: DISTRONIC ein- und ausschalten. Wunschgeschwindigkeit verändern; zusätzlich Gas geben um Spurwechsel vorzunehmen und zu überholen. Wunschabstand anpassen usw. StVO immer beachten!	
Warnmeldungen:	
Kommentare Proband:	
Bemerkungen Versuchsleiterin (Störung System, Stau, Regen usw.)	
Verkehrsdichte: <input type="checkbox"/> niedrig <input type="checkbox"/> mittel <input type="checkbox"/> hoch	
Helligkeit: <input type="checkbox"/> sehr hell, blendend <input type="checkbox"/> hell, nicht blendend <input type="checkbox"/> bedeckt	
Sicht: <input type="checkbox"/> klar <input type="checkbox"/> Nebel <input type="checkbox"/> Regen	
Was gefällt Ihnen an dieser Anzeige?	
Was gefällt Ihnen nicht an dieser Anzeige?	
Verbesserungsvorschläge?	

Anmerkung: DISTRONIC = Abstandsregeltempomat.

## Akzeptanzfragebogen für Experiment 3

Sie haben zwei Anzeigen des DISTRONIC-Systems kennengelernt. Uns interessiert jetzt, wie Sie diese beiden Anzeigen aus Ihrer persönlichen Sicht bewerten.

Beantworten Sie dazu bitte die folgenden Fragen zur:

- A - Ästhetik (Attraktivität, Schönheit)
- B - Funktionalität
- C - Qualität
- D - Allgemeine Einschätzung der Anzeigen des Systems

Kreuzen Sie dazu bitte jeweils spontan die Antwortmöglichkeit an, die am ehesten Ihre persönliche Einschätzung widerspiegelt!

Und denken Sie bitte daran, dass Sie ausschließlich die Anzeigen bewerten und nicht das System!

*Die Versuchsleiterin legt der Versuchsteilnehmerin/ dem Versuchsteilnehmer jeweils einen Screenshot der Anzeigen A und B vor, mit welchen sie/er während der Versuchsfahrt gefahren ist.*

### A1 Ästhetische Bewertung – Detaildarstellung

Wie finden Sie die Darstellung der Autos?

	viel zu undetailliert	etwas zu undetailliert	genau richtig	etwas zu detailliert	viel zu detailliert
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wie finden Sie die Darstellung der restlichen Elemente?

	viel zu undetailliert	etwas zu undetailliert	genau richtig	etwas zu detailliert	viel zu detailliert
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### A2 Ästhetische Bewertung – Farbdarstellung

Wie finden Sie die farbliche Gestaltung der Autos in der Anzeige?

	viel zu farblos	etwas zu farblos	genau richtig	etwas zu bunt	viel zu bunt
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wie finden Sie die farbliche Gestaltung der restlichen Elemente?

	viel zu farblos	etwas zu farblos	genau richtig	etwas zu bunt	viel zu bunt
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



### => Fortsetzung A2 Ästhetische Bewertung - Farbdarstellung

Wie finden Sie die farbliche Gestaltung des Hintergrundes?

	viel zu farblos	etwas zu farblos	genau richtig	etwas zu bunt	viel zu bunt
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Farben der gesamten Anzeige harmonisieren.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### A3 Ästhetische Bewertung – Art der Darstellung

Die Darstellung des Abstandes gefällt mir.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Darstellung der Autos wirkt professionell.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Gestaltung des Tachometers der DISTRONIC-Anzeige ist gelungen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### A4 Ästhetische Bewertung – Form und Größe

Wie finden Sie die Größe der Anzeige im Vergleich zu anderen Bedienelementen im Cockpit?

	viel zu klein	etwas zu klein	genau richtig	etwas zu groß	viel zu groß
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Form und die Größe der Bildelemente in der Anzeige harmonisieren.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## => Fortsetzung A4 Ästhetische Bewertung – Form und Größe

Die Form der Autos gefällt mir.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Form der restlichen Elemente gefällt mir.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die in der Anzeige gewählte Perspektive gefällt mir.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## A5 Ästhetische Bewertung – Gesamtbewertung

Wie bewerten Sie die Ästhetik der Anzeige auf einer Skala von 0 bis 10, wobei 0 = misslungen und 10 = optimal bedeuten?

Anz. A	0		10
Anz. B	0		10

## B1 Bewertung der Funktionalität – Position / Ergonomie

Die Position der Anzeige gefällt mir.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wie könnte man die Position der Anzeige A verbessern?

Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
--------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

Wie könnte man die Position der Anzeige B verbessern?

Wie finden Sie die Größe der Anzeige (um alles gut und einfach zu erkennen)?

	viel zu klein	etwas zu klein	genau richtig	etwas zu groß	viel zu groß
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Alle Elemente sind deutlich zu erkennen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## B2 Bewertung der Funktionalität – Verständnis und Informationsvermittlung

Wie hilfreich ist die Anzeige für das Erlernen des Systems?

	überhaupt nicht hilfreich	kaum hilfreich	etwas hilfreich	ziemlich hilfreich	sehr hilfreich
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die in der Anzeige verwendeten Symbole und Bezeichnungen sind verständlich.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Anzeige hilft mir, die Funktionsweise der DISTRONIC zu verstehen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Es ist einfach, einen Überblick über alle Informationen zu behalten.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Anzeige ist übersichtlich gestaltet.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die in der Anzeige gewählte Perspektive ist sinnvoll.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Mir ist anhand der Anzeige klar, wann ich selber bremsen muss.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## => Fortsetzung B2 Bewertung der Funktionalität – Verständnis und Informationsvermittlung

Ich kann die Informationen der Anzeige ohne viel Umdenken auf die Fahrsituation übertragen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Es ist gut zu erkennen, ob die DISTRONIC ein- oder ausgeschaltet ist.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Es ist gut zu erkennen, welche Wunschgeschwindigkeit eingestellt ist.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Es ist gut zu erkennen, welcher Wunschabstand eingestellt ist.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Es ist gut zu erkennen, ob ein vorausfahrendes Fahrzeug erkannt wird.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## B3 Bewertung der Funktionalität – Sicherheit

Ich fühle mich mit der Anzeige beim Fahren sicher.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Anzeige lenkt mich beim Fahren ab.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**=> Fortsetzung B3 Bewertung der Funktionalität – Sicherheit**

Gefahrensituationen sind mit Hilfe der Anzeige eindeutig zu erkennen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Gefahrensituationen sind mit Hilfe der Anzeige schnell zu erkennen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Im Zweifel verlasse ich mich lieber nicht auf die Anzeige.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**B4 Bewertung der Funktionalität – Nutzen**

Wie hoch schätzen Sie den Nutzen dieser Anzeige für das System DISTRONIC ein?

	sehr niedrig	eher niedrig	mittelmäßig	eher hoch	sehr hoch
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich halte diese Anzeige für eine unnötige Spielerei.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

**B5 Bewertung der Funktionalität – Gesamtbewertung**

Wie bewerten Sie die Funktionalität der Anzeige auf einer Skala von 0 bis 10, wobei 0 = misslungen und 10 = optimal bedeuten?

Anz. A	0		10
Anz. B	0		10

### C1 Bewertung der Qualität – Aktualität / Modernität

Die Symbole der Anzeige wirken modern.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Anzeige scheint mir auf dem neuesten Stand zu sein.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### C2 Bewertung der Qualität – Fehleranfälligkeit

Die Anzeige erscheint wenig fehleranfällig.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### C3 Bewertung der Qualität – Auflösung

Wie finden Sie die Auflösung (Schärfe) des Displays?

	viel zu gering	etwas zu gering	genau richtig	etwas zu hoch	viel zu hoch
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### C4 Bewertung der Qualität – Gesamtbewertung

Wie bewerten Sie die Qualität der Anzeige auf einer Skala von 0 bis 10, wobei 0 = misslungen und 10 = optimal bedeuten?

Anz. A	0		10
Anz. B	0		10

## D1 Wie bewerten Sie die Anzeigen des DISTRONIC-Systems aus Ihrer persönlichen Sicht?

Diese Anzeige finde ich sinnvoll.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Mit dieser Anzeige würde ich mich wohl fühlen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Diese Anzeige ist nichts für mich.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Anzeige ist vertrauenswürdig.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich finde, die Anzeige ist sehr nützlich.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich bin von dieser Anzeige begeistert.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Diese Anzeige zu besitzen, ist für mich ein absolutes Muss.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## => Fortsetzung D1 Wie bewerten Sie die Anzeigen des Distronic-Systems aus Ihrer persönlichen Sicht?

Ich denke, diese Anzeige ist unsicher.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

So eine Anzeige ist eine tolle Idee.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Anzeige passt zu mir.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Diese Anzeige gefällt mir überhaupt nicht.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Diese Anzeige ist eine wertvolle Unterstützung.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Die Anzeige sagt mir spontan zu.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>



## D2 Was glauben Sie, denken andere über die Anzeigen des Distronic-Systems?

Mit dieser Anzeige könnte ich mich bei meinen Freunden sehen lassen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Andere würden es gut finden, wenn ich das System mit dieser Anzeige hätte.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Mit dem System mit dieser Anzeige würde ich vor meinen Freunden etwas hermachen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## D3 Wie werden Sie in Zukunft mit den Anzeigen des Distronic-Systems umgehen?

Wenn ich das System mit dieser Anzeige im Fahrzeug hätte, würde ich es regelmäßig nutzen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich möchte gern mehr Informationen über diese Anzeige erhalten.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich werde einen Kauf des Systems mit dieser Anzeige in Betracht ziehen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### => Fortsetzung D3 Wie werden Sie in Zukunft mit den Anzeigen des Distronic-Systems umgehen?

Ich werde mich dafür einsetzen, dass das System mit dieser Anzeige nicht zum Einsatz kommt.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich werde Zeit investieren, um weitere Informationen über diese Anzeige zu sammeln.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich würde das System mit dieser Anzeige gern in meinem Auto besitzen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich werde anderen Menschen vom Kauf des Systems mit dieser Anzeige abraten.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich werde das System mit dieser Anzeige weiterempfehlen.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Ich möchte das System mit dieser Anzeige gern intensiver ausprobieren.

	stimme überhaupt nicht zu	stimme eher nicht zu	stimme teilweise zu	stimme überwiegend zu	stimme völlig zu
Anz. A	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Anz. B	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Vielen Dank! Sie haben den Fragebogen geschafft. Bitte wenden Sie sich an die Versuchsleiterin.

**Auswertung des Akzeptanzfragebogens (Fragebogenteil D)**

<b>Skala</b>	<b>Iteminhalt</b>	<b>Polung</b>
<b>Einstellung</b>	sinnvoll	+
	unsicher	-
	sehr nützlich	+
	wertvolle Unterstützung	+
	wohl fühlen	+
	vertrauenswürdig	+
	begeistert	+
	gefällt mir überhaupt nicht	-
	sagt spontan zu	+
	tolle Idee	+
	ist nichts für mich	-
	passt zu mir	+
	Besitz ist absolutes Muss	+
<b>Soziale Norm</b>	bei meinen Freunden sehen lassen	+
	vor Freunden etwas hermachen	+
	andere finden es gut, wenn ich es habe	+
<b>Akzeptanz</b>	gern in meinem Auto besitzen	+
	Kauf in Betracht ziehen	+
	regelmäßig nutzen	+
	weiterempfehlen	+
<b>Ablehnung</b>	anderen vom Kauf abraten	+
	dafür einsetzen, dass System nicht zum Einsatz kommt	+
<b>Interesse</b>	mehr Informationen erhalten	+
	Zeit investieren, um weitere Informationen zu sammeln	+
	möchte es intensiver ausprobieren	+

### Fragebogen zur Bewertung der Perspektiven für Experiment 3

Bitte bewerten Sie die drei Perspektiven der 3D-Anzeige des DISTRONIC-Systems, die Sie gerade erprobt haben!

Kreuzen Sie dazu bitte spontan die Perspektive an, die Ihrer Meinung nach die jeweilige Frage am besten beantwortet!

Welche Perspektive finden Sie am attraktivsten (schönsten, ästhetischsten)?

niedriger Winkel	mittlerer Winkel	hoher Winkel	alle gleich
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bei welcher Perspektive fällt Ihnen die Schätzung des Abstandes zum vorausfahrenden Fahrzeug am leichtesten?

niedriger Winkel	mittlerer Winkel	hoher Winkel	alle gleich
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Bei welcher Perspektive fällt Ihnen der Abgleich der Sicht aus dem Fahrzeug mit der Darstellung auf dem Display am leichtesten?

niedriger Winkel	mittlerer Winkel	hoher Winkel	alle gleich
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welche Perspektive finden Sie als Anzeige der DISTRONIC im Fahrzeug insgesamt am besten geeignet?

niedriger Winkel	mittlerer Winkel	hoher Winkel	alle gleich
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

## Anhang D – Experiment 4

**Tabelle D-1: Geometrische Parameter für Experiment 4**

Anzeigen =>	3D-komplex-15°	3D-komplex-22.5° 3D-einfach-22.5°
Höhenwinkel	15°	22.5°
Azimutwinkel	0°	
vertikaler Kameraöffnungswinkel	41°	30°
Distanz Kamera zu Bildmittelpunkt	29.3 DEH	65 DEH
Position Bildmittelpunkt (x; y; z)	0; 0; 30	0; 0; 35
Kameraposition (x; y; z)	0; 7.39; 1.63	0; 25; -25
Position Mitte eigenes Fahrzeug (x; y; z)	0; 0; 0	
Position vord. Stoßstange eigenes Fzg. (z)	-10	
Länge Fahrzeug (ca. 5 m )	20 DEH	
max. Abstand zw. den Fahrzeugen (150 m)	80 DEH	

Anmerkung: DEH = Displayeinheiten. Die optische Stauchung weiter entfernter Segmente wegen der größeren Kameraöffnungswinkel wurde durch einen Korrekturfaktor von maximal 3.2 ausgeglichen. Angewendet auf die 20 Segmente ergab sich eine Tiefe von 2.13 Displayeinheiten für das erste Segment und von 6.84 Displayeinheiten für das letzte Segment (jeweils inkl. Zwischenraum) (vgl. Kap. 9).

**Tabelle D-2: Parameter der Fahrsimulation für Experiment 4**

Aufgaben =>	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4
<i>M</i> Geschwindigkeit in km/h	90.1 - 91.6	80.6 - 82.0	83.7 - 85.4	86.1 - 86.4
<i>SD</i> Geschwindigkeit in km/h	10.9 - 11.4	12.1 - 12.8	7.6 - 7.8	8.0 - 8.3
<i>M</i> Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug in %	41.1 - 44.2	22.9 - 24.0	23.7 - 24.4	25.5 - 26.1
<i>SD</i> Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug in %	20.9 - 23.0	8.8 - 9.9	9.4 - 9.8	12.0 - 12.7
<i>M</i> Abstand bei Trigger in %	41.0 - 43.5	32.2 - 34.1	20.7 - 21.6	21.6 - 22.3
<i>SD</i> Abstand bei Trigger in %	21.2 - 23.3	12.3 - 14.1	4.0 - 4.9	4.6 - 5.6
<i>M</i> Wunschabstand unter-/überschritten in %	-	4.1 - 5.6	-	-
<i>SD</i> Wunschabstand unter-/überschritten in %	-	27.0 - 31.5	-	-

Anmerkungen: In den Zellen sind der minimale und der maximale Mittelwert der fünf Anzeigen aufgeführt. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Anzeigen.

**Tabelle D-3: Qualität der Daten in den Distanzschätzungsaufgaben  
Experiment 4**

Aufgabe =>	Aufgabe 1	Aufgabe 2
Maximal mögliche Anzahl der Messwerte	1300	
Häufigkeit Missing: Aufgabe nicht gestellt, falsche Bearbeitung	17	15
Fehler Voicekey: zu früh (< 200ms) bzw. nicht ausgelöst	100 (7.7%)	71 (5.5%)
Anzahl der ausgewerteten Aufgaben für die Reaktionszeiten	9.1	9.4
Anzahl der ausgewerteten Aufgaben für die Distanzschätzung	9.9	9.9

**Tabelle D-4: Qualität der Blickdaten für Experiment 4**

Aufgabe =>	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4
Auswertbare Zeit während der dreiminütigen Versuchsfahrten in s	174.5 (173.3–175.5)	174.4 (173.3–175.1)	174.2 (173.8–174.7)	175.5 (174.8–176.0)
Auswertbare Zeit während der Aufgabenlösungszeit in s	12.7 (12.0–13.3)	13.2 (12.7–13.7)	8.3 (7.1–9.3)	13.6 (13.1–14.3)
Zeiten ohne Daten in der Blickerfassung während der dreiminütigen Versuchsfahrten in s	4.3 (3.4–5.6)	4.2 (3.7–4.7)	4.5 (4.1–4.8)	3.2 (2.7–4.2)
Reliabilität der Blickerfassung (maximal = 1)	0.6 (0.57–0.60)	0.59 (0.58–0.59)	0.62 (0.61–0.62)	0.6 (0.59–0.62)
Anteil der Blicke auf den Rand um die Leinwand in %	2.1% (1.5–2.6)	2.6% (1.9–3.1)	2.0% (1.7–2.4)	2.2% (1.7–2.5)

Anmerkungen: In den Zellen sind die Mittelwerte über alle fünf Anzeigen sowie die minimalen und maximalen Mittelwerte aufgeführt. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Anzeigen.

**Tabelle D-5: Ergebnisse Aufgabendaten für Experiment 4**

AV	Anzeigen					ANOVA		Anz 1 vs. Anz 2	Anz 2 vs. Anz 3	Anz 3 vs. Anz 4	Anz 4 vs. Anz 5	2D vs. 3D	einfach vs. komplex
						F-Wert (df)	$\epsilon$	t-Wert (df)	t-Wert (df)	t-Wert (df)	t-Wert (df)	t-Wert (df)	t-Wert (df)
	Anz 1	Anz 2	Anz 3	Anz 4	Anz 5								
A 1	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)								
	RZ ms (365)	1202 (222) (259)	1312 (295)	1353 (376)	1377 (292)	5.19** (4, 100)	0.70	-0.36 (25)	-2.32* (25)	-1.25 (25)	-0.44 (25)	-4.38*** (25)	-3.87** (25)
A 2	DIS % (2.1)	5.6 (2.3)	11.0 (4.8)	13.4 (5.5)	17.3 (7.1)	59.63*** (4, 100)	0.51	0.99 (25)	-7.35*** (25)	-2.73* (25)	-4.75*** (25)	-9.42*** (25)	-9.06*** (25)
	RZ ms (277)	1405 (312)	1361 (302)	1336 (314)	1422 (294)	1.45 (4, 100)	0.92	-0.16 (25)	1.15 (25)	0.65 (25)	-2.14* (25)	- <sup>a</sup>	- <sup>a</sup>
A 3	DIS % (5.4)	13.9 (5.2)	18.9 (4.7)	22.9 (7.5)	27.2 (8.6)	29.58*** (4, 100)	0.77	-2.06* (25)	-3.21** (25)	-2.83** (25)	-3.05** (25)	-7.41*** (25)	-7.33*** (25)
	RZ ms (202)	781 (226)	923 (259)	1001 (254)	990 (247)	15.07*** (4, 96)	0.70	1.10 (25)	-6.36*** (25)	-1.91 <sup>o</sup> (25)	0.25 (25)	-8.18*** (25)	-6.71*** (25)
A 4	RZ ms (281)	1405 (264)	1406 (236)	1431 (272)	1420 (277)	0.52 (4, 100)	0.72	-0.56 (25)	-0.01 (25)	-1.10 (25)	0.28 (25)	- <sup>a</sup>	- <sup>a</sup>

Anmerkungen: AV = Abhängige Variablen; A = Aufgabe; RZ = Reaktionszeit; DIS = Abweichung der Distanzschätzung; 2D = Anzeigen 1 und 2;

3D = Anzeigen 3, 4 und 5; einfach = visuell einfache Anzeigen 1, 2 und 3; komplex = visuell komplexe Anzeigen 4 und 5.

<sup>a</sup> Ergebnisse *t*-Test waren nicht signifikant bzw. aufgrund der Daten für die einzelnen Anzeigen nicht interpretierbar.

<sup>o</sup>  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

Tabelle D-6: Ergebnisse Blickdaten für Experiment 4

Abhängige Variablen	Anzeigen					ANOVA		Anz 1 vs. Anz 2	Anz 2 vs. Anz 3	Anz 3 vs. Anz 4	Anz 4 vs. Anz 5
	Anz 1	Anz 2	Anz 3	Anz 4	Anz 5	F-Wert (df)	$\epsilon$				
Aufgabe 1	<i>M</i> (SD)	<i>M</i> (SD)	<i>M</i> (SD)	<i>M</i> (SD)	<i>M</i> (SD)			<i>t</i> -Wert (df)	<i>t</i> -Wert (df)	<i>t</i> -Wert (df)	<i>t</i> -Wert (df)
	BA-F	89.6 (53.2)	82.9 (45.9)	89.3 (52.2)	90.0 (50.3)	82.3 (44.0)	0.73	1.05 (19)	-1.02 (19)	-0.12 (19)	1.30 (19)
	BA-A	9.6 (3.5)	9.1 (4.9)	9.5 (4.7)	10.8 (5.8)	10.3 (4.7)	0.67	0.43 (19)	-0.32 (19)	-1.67 (19)	0.26 (19)
	BD-F %	37.1 (21.4)	35.5 (20.1)	35.4 (19.6)	38.2 (22.8)	35.0 (19.5)	0.88	0.78 (19)	0.03 (19)	-1.51 (19)	1.66 (19)
Aufgabe 2	BD-A %	59.3 (16.6)	60.2 (19.7)	56.2 (18.0)	58.3 (19.4)	58.3 (13.9)	0.82	-0.29 (19)	1.43 (19)	-0.82 (19)	0.01 (19)
	BA-F	100.0 (58.6)	80.7 (42.8)	86.2 (45.9)	87.1 (50.8)	89.7 (45.1)	0.81	2.43* (19)	-0.85 (19)	-0.14 (19)	-0.41 (19)
	BA-A	10.4 (4.9)	9.3 (4.5)	9.6 (4.3)	10.1 (4.2)	10.5 (5.2)	0.80	1.25 (19)	-0.36 (19)	-0.51 (19)	-0.30 (19)
	BD-F %	40.7 (20.2)	37.2 (21.0)	37.7 (21.4)	36.6 (22.0)	41.2 (19.5)	0.76	1.51 (19)	-0.27 (19)	0.46 (19)	-2.42* (19)
Aufgabe 3	BD-A %	64.2 (16.8)	58.7 (18.5)	59.6 (19.4)	58.3 (18.6)	65.4 (17.0)	0.81	1.97° (19)	-0.33 (19)	0.43 (19)	-2.30* (19)
	BA-F	91.1 (55.6)	74.6 (63.3)	87.1 (50.9)	82.0 (46.5)	77.4 (44.6)	0.70	1.66 (18)	-1.84° (18)	0.99 (18)	0.68 (18)
	BA-A	5.5 (3.6)	5.0 (4.2)	7.1 (3.6)	6.0 (2.6)	6.3 (3.7)	0.93	0.61 (18)	-2.39* (18)	1.09 (18)	-0.30 (18)
	BD-F %	27.1 (17.0)	20.6 (18.8)	26.2 (17.2)	26.1 (16.9)	23.2 (14.8)	0.80	2.52* (18)	-3.51** (18)	0.04 (18)	1.32 (18)
Aufgabe 4	BD-A %	38.4 (24.0)	28.8 (26.1)	38.7 (21.5)	35.6 (21.6)	31.0 (20.2)	0.83	2.13* (18)	-2.69* (18)	0.85 (18)	1.41 (18)
	BA-F	82.8 (54.3)	76.9 (55.0)	79.0 (56.5)	73.7 (62.8)	78.9 (67.0)	0.65	0.60 (19)	-0.52 (19)	0.61 (19)	-0.84 (19)
	BA-A	10.0 (3.3)	10.8 (3.8)	11.6 (5.6)	10.9 (4.7)	11.4 (7.5)	0.60	-0.95 (19)	-0.83 (19)	0.64 (19)	-0.38 (19)
	BD-F %	26.5 (16.7)	23.8 (16.4)	26.2 (16.5)	25.5 (20.5)	25.1 (16.0)	0.76	1.08 (19)	-1.69 (19)	0.28 (19)	0.16 (19)
	BD-A %	56.7 (24.1)	56.5 (18.9)	57.7 (20.9)	55.3 (23.4)	58.0 (22.4)	0.62	0.06 (19)	-0.52 (19)	0.62 (19)	-0.89 (19)

Anmerkungen: BA = Blickanzahl; BD = Blickdauer; F = Auswertung über gesamte dreiminütige Versuchsfahrt; A = Auswertung über Aufgabenlösungszeit. Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den 2D- und 3D-Anzeigen bzw. zwischen den einfachen und komplexen Anzeigen.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .



**Tabelle-D7: Ergebnisse Fahrdaten für Experiment 4 – Gesamte Fahrt**

Abhängige Variablen	Anzeigen					ANOVA		Anz 1 vs. Anz 2	Anz 2 vs. Anz 3	Anz 3 vs. Anz 4	Anz 4 vs. Anz 5
	Anz 1	Anz 2	Anz 3	Anz 4	Anz 5	F-Wert (df)	$\varepsilon$	t-Wert (df)	t-Wert (df)	t-Wert (df)	t-Wert (df)
Aufgabe 1	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	M (SD)	3.60* (4, 100)	0.75	1.24 (25)	-0.27 (25)	-1.04 (25)	-1.81° (25)
	LP cm	42.5 (13.8)	40.6 (12.2)	41.1 (9.5)	43.0 (13.6)	47.0 (18.3)	0.80	-0.01 (25)	1.17 (25)	0.42 (25)	-3.48** (25)
	LW °	7.8 (1.0)	7.8 (0.6)	7.6 (0.7)	7.5 (0.8)	8.3 (1.1)	0.66	0.58 (25)	0.10 (25)	-0.94 (25)	-2.08* (25)
Aufgabe 2	SÜ	5.8 (4.7)	5.5 (3.5)	5.5 (3.4)	5.9 (3.7)	7.3 (4.1)	0.78	-0.76 (25)	0.06 (25)	-0.51 (25)	-1.80° (25)
	LP cm	36.5 (9.9)	37.4 (12.2)	37.3 (9.3)	37.9 (10.7)	40.7 (12.2)	0.77	-1.24 (25)	2.13* (25)	-0.49 (25)	-2.21* (25)
	LW °	6.8 (0.7)	7.1 (1.2)	6.6 (0.7)	6.7 (0.8)	7.1 (1.1)	0.80	-0.67 (25)	0.31 (25)	-1.00 (25)	-0.61 (25)
Aufgabe 3	SÜ	3.8 (3.7)	4.2 (3.3)	4.0 (3.3)	4.6 (3.0)	5.0 (3.0)	0.78	-0.14 (24)	-1.00 (24)	-0.59 (24)	0.46 (24)
	LP cm	32.8 (9.4)	33.0 (7.8)	34.2 (10.6)	35.2 (9.6)	34.5 (9.3)	0.90	-0.75 (24)	0.37 (24)	-0.03 (24)	-0.42 (24)
	LW °	6.8 (0.7)	6.9 (0.7)	6.9 (0.8)	6.9 (0.6)	7.0 (0.6)	0.76	-0.48 (24)	-0.80 (24)	1.01 (24)	-0.71 (24)
Aufgabe 4	SÜ	3.4 (3.4)	3.7 (4.4)	4.2 (4.1)	3.5 (2.7)	3.8 (3.4)	0.65	0.47 (25)	-0.33 (25)	-2.05* (25)	1.19 (25)
	LP cm	34.5 (10.0)	34.0 (10.0)	34.4 (9.5)	37.5 (9.7)	35.6 (8.1)	0.96	0.25 (25)	0.02 (25)	-0.16 (25)	-0.22 (25)
	LW °	7.1 (0.6)	7.1 (0.7)	7.1 (0.7)	7.1 (0.8)	7.2 (0.8)	0.77	0 (25)	1.93° (25)	-2.52* (25)	-0.02 (25)
Aufgabe 5	SÜ	4.0 (3.5)	4.0 (3.8)	3.0 (2.6)	4.3 (3.4)	4.3 (3.3)					

Anmerkungen: LP = Streuung der lateralen Position; LW = Streuung des Lenkwinkels in Grad; SÜ = Anzahl Spurüberschreitungen. Es gab keine signifikanten

Unterschiede zwischen den 2D- und 3D Anzeigen bzw. zwischen den einfachen und komplexen Anzeigen.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle-D8: Ergebnisse zur subjektiven Bewertung für Experiment 4**

Items im Fragebogen	Anzeigen					Friedmann-Test	Anz 1 vs. Anz 2	Anz 2 vs. Anz 3	Anz 3 vs. Anz 4	Anz 4 vs. Anz 5	2D vs. 3D	einfach vs. komplex
	Anz 1	Anz 2	Anz 3	Anz 4	Anz 5							
	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	$\chi^2$ -Wert ( <i>df</i> , <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )	Z-Wert ( <i>N</i> )
Schwierigkeit Distanzschätzung 1 = leicht	2.3 (1.4)	1.9 (1.1)	3.2 (1.0)	3.2 (1.2)	4.4 (0.9)	39.26*** (4, <i>N</i> =25)	-1.31 (25)	-3.34** (25)	-0.01 (25)	-3.71*** (25)	-3.80*** (25)	-3.40** (25)
Schwierigkeit Abgleich 1 = leicht	4.1 (1.2)	2.9 (1.3)	2.6 (0.8)	2.5 (1.3)	2.8 (1.7)	19.44** (4, <i>N</i> =25)	-4.11*** (25)	-1.16 (25)	-0.15 (25)	-0.83 (25)	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>
Ablenkung 1 = nicht ablenkend	2.8 (1.5)	2.0 (1.1)	3.0 (1.1)	3.2 (1.3)	4.0 (1.2)	24.43*** (4, <i>N</i> =25)	2.39* (25)	-2.89** (25)	-0.55 (25)	-2.83** (25)	-2.69** (25)	-2.67** (25)
Abstraktionsgrad 1 = optimal	3.7 (1.3)	2.9 (1.4)	2.7 (1.0)	2.7 (1.3)	3.0 (1.6)	9.28* (4, <i>N</i> =25)	-2.91** (25)	-0.37 (25)	-0.06 (25)	-0.94 (25)	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>
Attraktivität 1 = attraktiv	4.2 (1.3)	3.4 (1.1)	3.0 (1.0)	2.1 (1.1)	2.2 (1.5)	29.35*** (4, <i>N</i> =25)	-2.86** (25)	-1.42 (25)	-2.35* (25)	-0.29 (25)	-2.96** (25)	-3.07** (25)
Gesamturteil 1 = sehr gut	3.6 (1.4)	2.7 (1.3)	2.6 (1.0)	2.6 (1.4)	3.5 (1.5)	9.82* (4, <i>N</i> =25)	-2.76** (25)	-0.24 (25)	0 (25)	-2.36* (25)	<sup>a</sup>	<sup>a</sup>
Graphische Details 1 = wenig Details	1.6 (0.7)	2.0 (0.6)	2.4 (0.9)	4.4 (0.5)	4.6 (0.5)	78.94*** (4, <i>N</i> =25)	-2.27* (25)	-1.14 (25)	-4.45*** (25)	-1.24 (25)	<sup>a</sup>	-4.91*** (25)
Realismus 1 = realistisch	4.8 (0.4)	4.0 (0.5)	2.8 (0.7)	1.7 (0.7)	1.5 (0.6)	82.72*** (4, <i>N</i> =25)	-3.76*** (25)	-4.05*** (25)	-3.38** (25)	-0.86 (25)	-4.71*** (25)	-4.61*** (25)

Anmerkungen: 2D = Anzeigen 1 und 2; 3D = Anzeigen 3, 4 und 5; einfach = visuell einfache Anzeigen 1, 2 und 3; komplex = visuell komplexe Anzeigen 4 und 5;

Z-Wert = Testgröße im Wilcoxon-Test.

<sup>a</sup> Ergebnisse *t*-Test nicht signifikant bzw. aufgrund der Daten für die einzelnen Anzeigen nicht interpretierbar.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

## Fragebogen zur Bewertung der Anzeigen des ART

### Einzelbewertung nach den Versuchsfahrten mit einer Anzeige

Anzeige Nr.: \_\_\_\_\_

Bitte bewerten Sie die Anzeige, mit der Sie gerade gefahren sind! Entscheiden Sie für die folgenden Aussagen, inwieweit diese Ihrer Meinung nach zutreffen!

Kreuzen Sie dazu bitte jeweils spontan die Antwortmöglichkeit an, die am ehesten Ihre persönliche Einschätzung widerspiegelt!

Aussagen	trifft über- haupt nicht zu	trifft eher nicht zu	trifft teil- weise zu	trifft eher zu	trifft völlig zu
1. Die Anzeige enthält viele graphische Details.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Die Anzeige ist realistisch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Die Schätzung eines Abstandes fällt mit der Anzeige leicht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Der Abgleich der Sicht aus dem Fahrzeug mit der Darstellung auf dem Display fällt mit der Anzeige leicht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Die Anzeige lenkt beim Fahren ab.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Die Anzeige ist zu abstrakt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Die Anzeige ist attraktiv (schön, ästhetisch).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Die Anzeige ist insgesamt fürs Fahrzeug geeignet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Was hat Ihnen an der Anzeige besonders gut gefallen?

\_\_\_\_\_

Was hat Ihnen an der Anzeige überhaupt nicht gefallen?

\_\_\_\_\_

Welche Verbesserungsvorschläge haben Sie?

\_\_\_\_\_

## **Instruktion zur Bewertung der Anzeigen des Abstandsregeltempomaten**

### **Rangreihen am Ende des Experimentes über alle Anzeigen**

Bitte bringen sie alle fünf Anzeigen zu jedem der nachfolgenden Aspekte in eine Rangreihe! Es sind die gleichen Aspekte, die sie bereits nach jeder einzelnen Anzeige in einem Fragebogen beantwortet haben.

- Menge an graphischen Details
- Realismus der Anzeige
- Schwierigkeit der Abstandsschätzung
- Schwierigkeit des Abgleichs der Sicht aus dem Fahrzeug mit der Darstellung auf dem Display
- Ablenkungswirkung
- Attraktivität (Schönheit, Ästhetik)
- Gesamturteil für eine Verwendung im Fahrzeug

*Die Versuchsleiterin verteilt für jeden Aspekt die Screenshots der fünf Anzeigen zufällig auf einem Tisch. Die Probanden sortieren die Screenshots entsprechend ihrem Urteil. Die Versuchsleiterin protokolliert die Rangreihen der Anzeigen für jeden Aspekt.*

## Anhang E – Experiment 5

**Tabelle E-1: Disparitäten für Experiment 5**

Objekt	Tiefe <sup>a</sup>	Höhenwinkel 22.5°			Höhenwinkel 15°		
		Disparität <sup>b</sup> in cm	Disparität <sup>c</sup> in Bogenminuten	Tiefenwirkung <sup>c</sup> in cm	Disparität <sup>b</sup> in cm	Disparität <sup>c</sup> in Bogenminuten	Tiefenwirkung <sup>c</sup> in cm
Mitte Fahrzeug	0	0	0	0	0	0	0
Marker 0 m	10.0	0.10	4.3	1.27	0	0	0
Schrift	24.7	0.33	14.2	4.35	0.47	20.2	6.43
Marker 50 m	36.7	0.44	18.9	5.91	0.67	28.8	9.35
Marker 100 m	63.3	0.58	24.9	7.97	0.83	35.7	11.92
Marker 150 m	90.0	0.63	27.1	8.73	0.88	37.8	12.75
Hintergrundbild	374.5	0.83	35.7	11.92	0.93	40.0	13.60
Stereoparameter		Stereokameraabstand: 3.3 DEH Stereokamerawinkel: 1.2°			Stereokameraabstand: 4.1 DEH Stereokamerawinkel: 1.5°		

Anmerkungen: DEH = Displayeinheiten

<sup>a</sup> Distanz in z-Richtung in Displayeinheiten.

<sup>b</sup> Die Disparität in cm wurde mit Hilfe eines Pixellineals in den Anzeigen gemessen.

<sup>c</sup> Die Disparität in Bogenminuten und die Tiefenwirkung in cm wurden berechnet (s. Abschn. 5.4.3).

**Tabelle E-2: Parameter der Fahrsimulation für Experiment 5**

Aufgabe =>	Aufgabe 1	Aufgabe 2	Aufgabe 3	Aufgabe 4
<i>M</i> Geschwindigkeit in km/h	90.4 - 91.9	80.4 - 82.0	84.0 - 85.3	86.6 - 86.9
<i>SD</i> Geschwindigkeit in km/h	10.8 - 11.0	11.9 - 12.4	7.7 - 7.8	8.0 - 8.3
<i>M</i> Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug in %	42.1 - 44.0	22.6 - 23.7	23.3 - 24.0	25.7 - 26.7
<i>SD</i> Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug in %	20.9 - 22.1	8.3 - 9.2	8.8 - 9.8	12.6 - 13.7
<i>M</i> Abstand bei Trigger in %	40.1 - 43.0	32.1 - 33.8	20.6 - 21.5	21.4 - 21.8
<i>SD</i> Abstand bei Trigger in %	19.8 - 22.9	11.8 - 13.0	4.1 - 5.3	4.3 - 5.3
<i>M</i> Wunschabstand unter-/überschritten in %	-	2.0 - 4.3	-	-
<i>SD</i> Wunschabstand unter-/überschritten in %	-	26.0 - 28.9	-	-

Anmerkungen: In den Zellen sind der minimale und der maximale Mittelwert über die zwei Höhenwinkel und die zwei Displays aufgeführt. Weder zwischen den Höhenwinkeln noch zwischen den Displays gab es signifikante Unterschiede.

**Tabelle E-3: Qualität der Daten in den Distanzschätzungsaufgaben für Experiment 5**

Aufgabe =>	Aufgabe 1		Aufgabe 2	
Display =>	Mono	ASD	Mono	ASD
Maximal mögliche Anzahl der Messwerte	520 (N=26)	480 (N=24)	520 (N=26)	480 (N=24)
Häufigkeit Missing: Aufgabe nicht gestellt, falsche Bearbeitung	5	36	3	25
Fehler Voicekey: zu früh bzw. nicht ausgelöst	49 (9.4%)	81 (16.9%)	39 (7.5%)	47 (9.8%)
Anzahl der ausgewerteten Aufgaben für die Reaktionszeiten	9.0	8.3	9.2	8.5
Anzahl der ausgewerteten Aufgaben für die Distanzschätzung	9.9	9.3	9.9	9.5

Anmerkungen: Mono = Monoskopisches Display; ASD = Autostereoskopisches Display.

**Tabelle E-4: Qualität der Blickdaten für Experiment 5**

Aufgabe =>	Aufgabe 1		Aufgabe 2		Aufgabe 3		Aufgabe 4	
Display =>	Mo-no	ASD	Mo-no	ASD	Mo-no	ASD	Mo-no	ASD
Auswertbare Zeit während einer dreiminütigen Versuchsfahrt in s	175.8	176.3	176.1	177.0	174.8	176.3	176.0	176.2
Auswertbare Zeit während der Aufgabenlösungszeit in s	12.7	17.0	12.8	16.3	9.4	9.9	13.6	17.6
Zeiten ohne Daten in der Blickerfassung in s	3.1	3.1	2.8	2.4	4.0	3.0	2.8	3.1
Reliabilität der Blickerfassung (maximal = 1)	0.60	0.57	0.59	0.57	0.61	0.58	0.61	0.56
Anteil der Blicke auf den Rand um die Leinwand in %	1.9%	2.1%	2.7%	2.3%	2.1%	2.2%	1.3%	2.8%

Anmerkungen: Mono = Monoskopisches Display; ASD = Autostereoskopisches Display. In den Zellen sind die Mittelwerte über beide Höhenwinkel aufgeführt. Weder zwischen den Höhenwinkeln noch zwischen den Displays gab es signifikante Unterschiede.

**Tabelle-E5: Ergebnisse Aufgabendaten für Experiment 5**

Abhängige Variablen	Unabhängige Variablen				ANOVA		Display		Höhenwinkel		Höhenwinkel	
	Mono		ASD		Display	Höhenwinkel	H22.5° <sup>o</sup> Mono vs. H22.5° <sup>o</sup> ASD		H15° <sup>o</sup> Mono vs. H15° <sup>o</sup> ASD		H22.5° <sup>o</sup> Mono vs. H15° <sup>o</sup> ASD	
	H22.5°	H15°	H22.5°	H15°			<i>M</i> ( <i>SD</i> )		<i>M</i> ( <i>SD</i> )		<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	
A 1	RZ ms	1353 (376)	1377 (292)	1493 (307)	1638 (405)	-2.20* (48) <sup>a</sup>	8.48** (1, 48)	-1.43 (48)	-2.60* (48)	-0.44 (25)	-2.92** (23)	
	DIS %	13.4 (5.5)	17.3 (7.1)	15.6 (7.1)	19.9 (8.2)	1.78 (1, 48)	24.79** (1, 48)	-1.24 (48)	-1.20 (48)	-4.75*** (25)	-2.93** (23)	
A 2	RZ ms	1336 (314)	1422 (294)	1655 (320)	1706 (405)	-3.51** (48) <sup>a</sup>	2.97° (1, 48)	-3.56** (48)	-2.82** (48)	-2.14* (25)	-0.72 (23)	
	DIS %	22.9 (7.5)	27.2 (8.6)	20.7 (8.1)	23.9 (11.6)	1.45 (1, 48)	10.28** (1, 48)	0.99 (48)	1.13 (48)	-3.05** (25)	-1.69 (23)	
A 3	RZ ms	1001 (254)	990 (247)	975 (224)	974 (242)	0.12 (1, 47)	0.04 (1, 47)	0.24 (47)	0.34 (47)	0.25 (25)	0.04 (23)	
A 4	RZ ms	1444 (281)	1420 (277)	1542 (296)	1547 (316)	2.15 (1, 47)	0.08 (1, 47)	-1.50 (47)	-1.47 (47)	0.28 (25)	-0.10 (23)	

Anmerkungen: A = Aufgabe; RZ = Reaktionszeit; DIS = Abweichung der Distanzschätzung; Mono = Monoskopisches Display;

ASD = Autostereoskopisches Display; H = Höhenwinkel. Keine der Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Display und Höhenwinkel war signifikant.

<sup>a</sup> Anstelle der ANOVA wurde ein *t*-Test für unabhängige Stichproben mit einer Korrektur der Varianzhomogenität gerechnet.

<sup>o</sup>  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .



Tabelle E-6: Ergebnisse Blickdaten für Experiment 5

Abhängige Variablen	Unabhängige Variablen				ANOVA		Display		Höhenwinkel		Höhenwinkel	
	Mono		ASD		Display	Höhenwinkel	H22.5° Mono vs. H22.5° ASD	H15° Mono vs. H15° ASD	H22.5° Mono vs. H15° Mono	H22.5° ASD vs. H15° ASD	H22.5° ASD vs. H15° ASD	H22.5° ASD vs. H15° ASD
	H22.5°	H15°	H22.5°	H15°								
	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )
Aufgabe 1	BA-F	90.0 (50.3)	82.3 (44.0)	98.7 (65.7)	88.9 (56.1)	0.21 (1, 37)	3.54° (1, 37)	-0.41 (37)	1.30 (19)	1.36 (18)		
	BA-A	10.7 (5.8)	10.3 (4.7)	12.2 (6.1)	13.5 (5.4)	2.15 (1, 37)	0.14 (1, 37)	-0.72 (37)	0.26 (19)	-0.84 (18)		
	BD-F %	38.2 (22.8)	35.0 (19.5)	33.6 (22.1)	31.7 (21.7)	0.35 (1, 37)	3.13° (1, 37)	0.64 (37)	1.66 (19)	0.88 (18)		
	BD-A %	58.3 (19.4)	58.3 (13.9)	47.8 (21.6)	50.0 (18.6)	2.52 (1, 37)	0.18 (1, 37)	1.46 (37)	0.01 (19)	-0.51 (18)		
Aufgabe 2	BA-F	87.1 (50.8)	89.7 (45.1)	97.6 (56.9)	98.9 (68.2)	0.34 (1, 37)	0.12 (1, 37)	-0.61 (37)	-0.41 (19)	-0.14 (18)		
	BA-A	10.1 (4.2)	10.5 (5.2)	14.3 (4.2)	14.4 (6.5)	7.54* (1, 37)	0.04 (1, 37)	-2.77* (37)	-0.30 (19)	-0.02 (18)		
	BD-F %	36.6 (22.0)	41.2 (19.5)	36.6 (21.1)	35.4 (21.4)	0.21 (1, 37)	0.96 (1, 37)	0.0 (37)	-2.42* (19)	0.39 (18)		
	BD-A %	58.3 (18.6)	65.4 (17.0)	57.5 (15.3)	50.2 (20.0)	1.92 (1, 37)	0 (1, 37)	0.12 (37)	-2.30* (19)	1.22 (18)		
Aufgabe 3	BA-F	82.0 (46.5)	77.4 (44.6)	97.0 (65.4)	72.8 (51.4)	-0.33 (35) <sup>a</sup>	4.68* (1, 35)	-0.81 (35)	0.68 (18)	2.07° (17)		
	BA-A	6.0 (2.6)	6.3 (3.7)	7.3 (5.7)	4.7 (4.5)	0.01 (1, 35)	2.45 (1, 35)	-0.97 (35)	-0.30 (18)	2.11° (17)		
	BD-F %	26.1 (16.9)	23.2 (14.8)	31.8 (26.7)	24.6 (24.8)	-0.52 (35) <sup>a</sup>	9.14* (1, 35)	-0.78 (35)	1.32 (18)	2.83* (17)		
	BD-A %	35.6 (21.6)	31.0 (20.2)	37.6 (27.7)	29.4 (27.6)	-0.03 (35) <sup>a</sup>	5.87* (1, 35)	-0.24 (35)	1.41 (18)	1.95° (17)		
Aufgabe 4	BA-F	73.7 (62.8)	78.9 (67.0)	86.1 (49.3)	97.1 (78.2)	0.63 (1, 37)	1.0 (1, 37)	-0.68 (37)	-0.84 (19)	-0.72 (18)		
	BA-A	10.9 (4.7)	11.4 (7.5)	14.3 (10.0)	11.1 (5.5)	0.65 (1, 37)	1.11 (1, 37)	-1.37 (37)	-0.38 (19)	1.56 (18)		
	BD-F %	25.5 (20.5)	25.1 (16.0)	31.3 (22.9)	33.2 (26.2)	-1.04 (37) <sup>a</sup>	0.17 (1, 37)	-0.84 (37)	0.16 (19)	-0.63 (18)		
	BD-A %	55.3 (23.4)	58.0 (22.4)	50.5 (24.3)	56.2 (22.7)	0.22 (1, 37)	3.24° (1, 37)	0.63 (37)	-0.89 (19)	-1.58 (18)		

Anmerkungen: BA = Blickanzahl; BD = Blickdauer; F = Auswertung über gesamte dreiminütige Versuchsfahrt; A = Auswertung über Aufgabenlösungszeit;

Mono = Monoskopisches Display; ASD = Autostereoskopisches Display; H = Höhenwinkel. Signifikante Wechselwirkungen sind im Text vermerkt.

<sup>a</sup> Anstelle der ANOVA wurde ein *t*-Test für unabhängige Stichproben mit einer Korrektur der Varianzhomogenität gerechnet.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .



**Tabelle E-7: Ergebnisse Fahrdaten für Experiment 5 – Gesamte Fahrt**

Abhängige Variablen	Unabhängige Variablen				ANOVA		Display		Höhenwinkel	
	Mono		ASD		Display	Höhenwinkel	H22.5° vs. H22.5° ASD	H15° vs. H15° ASD	H22.5° vs. H15° Mono	H22.5° vs. H15° ASD
	H22.5°	H15°	H22.5°	H15°						
Aufgabe 1	<i>M</i> (SD)	<i>M</i> (SD)	<i>M</i> (SD)	<i>M</i> (SD)	<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>F</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )	<i>t</i> -Wert ( <i>df</i> )
	LP cm	43.0 (13.6)	47.0 (18.3)	45.0 (12.4)	0.18 (1, 48)	4.23* (1, 48)	-0.56 (48)	-0.26 (48)	-1.81° (25)	-1.16 (23)
	LW °	7.5 (0.8)	8.3 (1.1)	8.4 (1.1)	-2.89** (48) <sup>a</sup>	4.87* (1, 48)	-3.34** (48)	-0.89 (48)	-3.48** (25)	-0.27 (23)
Aufgabe 2	SÜ	5.9 (3.7)	7.3 (4.1)	6.4 (3.4)	0 (1, 48)	3.29° (1, 48)	-0.49 (48)	0.42 (48)	-2.08* (25)	-0.58 (23)
	LP cm	37.9 (10.7)	40.7 (12.2)	40.4 (10.3)	0.10 (1, 48)	1.27 (1, 48)	-0.84 (48)	0.18 (48)	-1.80° (25)	0.22 (23)
	LW °	6.7 (0.8)	7.1 (1.1)	7.4 (0.7)	3.62° (1, 48)	0.28 (1, 48)	-3.52** (48)	-0.02 (48)	-2.21* (25)	0.99 (23)
Aufgabe 3	SÜ	4.6 (3.0)	5.0 (3.0)	5.1 (3.0)	0.03 (1, 48)	0 (1, 48)	-0.60 (48)	0.29 (48)	-0.61 (25)	0.64 (23)
	LP cm	35.2 (9.6)	34.5 (9.3)	36.0 (9.7)	0 (1, 47)	1.97 (1, 47)	-0.29 (47)	0.30 (47)	0.46 (24)	1.47 (23)
	LW °	6.9 (0.6)	6.9 (0.6)	7.4 (1.3)	4.60* (1, 47)	0.42 (1, 47)	-1.86° (47)	-1.12 (47)	-0.42 (24)	0.93 (23)
Aufgabe 4	SÜ	3.5 (2.7)	3.8 (3.4)	3.4 (3.2)	0.25 (1, 47)	0.01 (1, 47)	0.12 (47)	0.72 (47)	-0.71 (24)	0.35 (23)
	LP cm	37.5 (9.7)	35.6 (8.1)	37.1 (8.2)	0.02 (1, 47)	2.45 (1, 47)	0.16 (47)	0.07 (47)	1.19 (25)	1.03 (23)
	LW °	7.1 (0.8)	7.2 (0.8)	7.5 (0.8)	4.08* (1, 47)	0.02 (1, 47)	-1.55 (47)	-1.07 (47)	-0.22 (25)	0.37 (23)
	SÜ	4.3 (3.4)	4.3 (3.3)	4.4 (2.7)	0.16 (1, 47)	0.37 (1, 47)	-0.11 (47)	-0.58 (47)	-0.02 (25)	-0.71 (23)

Anmerkungen: Aufg. = Aufgabe; LP = Streuung der lateralen Position; LW = Streuung des Lenkwinkels in Grad; SÜ = Anzahl Spurüberschreitungen;

Mono = Monoskopisches Display; ASD = Autostereoskopisches Display; H = Höhenwinkel. Signifikante Wechselwirkungen sind im Text vermerkt.

<sup>a</sup> Anstelle von ANOVA *t*-Test für unabhängige Stichproben mit Korrektur für Varianzheterogenität gerechnet.

°  $p < .1$ ; \*  $p < .05$ ; \*\*  $p < .01$ ; \*\*\*  $p < .001$ .

**Tabelle E-8: Ergebnisse subjektive Bewertungen für Experiment 5**

Items im Fragebogen	Unabhängige Variablen				Gesamt		Display		Höhenwinkel	
	Mono		ASD		Display	Höhenwinkel	H22.5° <sub>Mono</sub> vs. H22.5° <sub>ASD</sub>	H15° <sub>Mono</sub> vs. H15° <sub>ASD</sub>	H22.5° <sub>Mono</sub> vs. H15° <sub>Mono</sub>	H22.5° <sub>ASD</sub> vs. H15° <sub>ASD</sub>
	H22.5°	H15°	H22.5°	H15°						
	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>M</i> ( <i>SD</i> )	<i>U</i> -Wert ( <i>N</i> <sub>Mono</sub> , <i>N</i> <sub>ASD</sub> )	<i>Z</i> -Wert ( <i>N</i> )	<i>U</i> -Wert ( <i>N</i> <sub>Mono</sub> , <i>N</i> <sub>ASD</sub> )	<i>U</i> -Wert ( <i>N</i> <sub>Mono</sub> , <i>N</i> <sub>ASD</sub> )	<i>Z</i> -Wert ( <i>N</i> )	<i>Z</i> -Wert ( <i>N</i> )
Schwierigkeit Distanzschätzung 1=leicht	2.3 (1.0)	3.5 (1.1)	2.5 (1.2)	3.2 (1.2)	293.0 (26, 24)	-4.62*** (50)	286.5 (26, 24)	255.5 (26, 24)	-3.68** (26)	-2.74** (24)
Schwierigkeit Abgleich 1=leicht	2.1 (0.8)	2.9 (1.2)	2.6 (0.9)	2.4 (1.1)	279.0 (26, 24)	-2.50* (50)	293.0 (26, 24)	248.0 (26, 24)	-2.46* (26)	-0.86 (24)
Ablenkung 1=nicht ablenkend	2.5 (0.9)	3.1 (1.2)	2.4 (1.1)	2.6 (1.1)	246.5 (26, 24)	-1.93° <i>p</i> =.053 (50)	300.0 (26, 24)	239.0 (26, 24)	-2.07* (26)	-0.64 (24)
Perspektive 1=sinnvoll	1.8 (0.9)	2.8 (1.6)	1.9 (1.0)	2.1 (1.0)	274.5 (26, 24)	-2.83** (50)	295.0 (26, 24)	248.5 (26, 24)	-2.83** (26)	-0.85 (24)
Attraktivität 1=attraktiv	2.2 (1.2)	3.1 (1.4)	2.7 (1.0)	2.7 (0.9)	306.0 (26, 24)	-2.47* (50)	228.0° (26, 24)	260.0 (26, 24)	-2.89** (26)	-0.28 (24)
Gesamturteil 1=sehr gut	2.2 (1.2)	3.3 (1.3)	2.5 (1.1)	2.7 (1.1)	274.0 (26, 24)	-3.51*** (50)	268.0 (26, 24)	221.5° (26, 24)	-3.26* (26)	-1.21 (24)

Anmerkungen: Mono = Monoskopisches Display; ASD = Autostereoskopisches Display; H = Höhenwinkel; U-Wert = Testgröße Mann-Whitney U-Test; Z-Wert = Testgröße Wilcoxon-Test.

° *p* < .1; \* *p* < .05; \*\* *p* < .01; \*\*\* *p* < .001.

## Fragebogen zur Bewertung des autostereoskopischen Displays (ASD)

### Teil 1: Bewertung der Nützlichkeit und Attraktivität

=> Gleicher Fragebogen wie in Experiment 4 nach den Versuchsfahrten mit einer Anzeige

Anzeige Nr.: \_\_\_\_\_

Bitte bewerten Sie die Anzeige, mit der Sie gerade gefahren sind! Entscheiden Sie für die folgenden Aussagen, inwieweit diese Ihrer Meinung nach zutreffen!

Kreuzen Sie dazu bitte jeweils spontan die Antwortmöglichkeit an, die am ehesten Ihre persönliche Einschätzung widerspiegelt!

Aussagen	trifft über- haupt nicht zu	trifft eher nicht zu	trifft teil- weise zu	trifft eher zu	trifft völlig zu
1. Die Anzeige enthält viele graphische Details.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Die Anzeige ist realistisch.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Die Schätzung eines Abstandes fällt mit der Anzeige leicht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Der Abgleich der Sicht aus dem Fahrzeug mit der Darstellung auf dem Display fällt mit der Anzeige leicht.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Die Anzeige lenkt beim Fahren ab.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Die Anzeige ist zu abstrakt.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Die Anzeige ist attraktiv (schön, ästhetisch).	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8. Die Anzeige ist insgesamt fürs Fahrzeug geeignet.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Was hat Ihnen an der Anzeige besonders gut gefallen?

\_\_\_\_\_

Was hat Ihnen an der Anzeige überhaupt nicht gefallen?

\_\_\_\_\_

Welche Verbesserungsvorschläge haben Sie?

\_\_\_\_\_

## Fragebogen zur Bewertung des autostereoskopischen Displays (ASD)

### Teil 2: Bewertung visueller Komfort und Qualität des stereoskopischen Tiefeneindrucks

Anzeige Nr.: \_\_\_\_\_

Bitte bewerten Sie anhand der folgenden Aussagen die 3D-Anzeige, welche Sie gerade während der Fahrt im Simulator erlebt haben!

Kreuzen Sie dazu bitte jeweils spontan die Antwortmöglichkeit an, die am ehesten Ihre persönliche Einschätzung widerspiegelt!

Das Betrachten dieser 3D-Anzeige empfand ich als ...

nicht ablenkend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr ablenkend
-----------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	----------------

Das Betrachten dieser 3D-Anzeige hat meine Augen ...

nicht beansprucht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr beansprucht
-------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------------------

Das Betrachten dieser 3D-Anzeige empfand ich als ...

sehr unangenehm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr angenehm
-----------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------

Der Bereich, in dem ich meinen Kopf bewegen und noch 3D-Sehen konnte, war ...

zu klein	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	ausreichend groß
----------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------------------

Wenn ich den Kopf bewegt habe, hat die 3D-Anzeige ... geruckelt.

überhaupt nicht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr stark
-----------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------------

Dieses Ruckeln der 3D-Anzeige empfand ich als ...

sehr störend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nicht störend
--------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------

Der 3D-Eindruck stellte sich beim Blickwechsel auf das Display ... ein.

sofort	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr spät
--------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	-----------

Der 3D-Eindruck war... aufrecht zu halten.

leicht	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	schwer
--------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------

Ich habe ... Doppelbilder gesehen.

ständig	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	nie
---------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	-----

Den 3D-Eindruck empfand ich als ...

zu intensiv (zu viel Tiefe)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	zu schwach (zu wenig Tiefe)
--------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------------

Die Schrift in der 3D-Anzeige war...

schlecht lesbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	gut lesbar
-----------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	------------

Die einzelnen Objekte in der 3D-Anzeige waren...

gut erkennbar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	schlecht erkennbar
---------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------

Die Auflösung (Schärfe) dieser 3D-Anzeige war ...

sehr gut	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	sehr schlecht
----------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------

## **Eidesstattliche Erklärungen**

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die Dissertation selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt habe.

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich mich bisher weder anderwärts um einen Doktorgrad beworben habe, noch bereits einen Doktorgrad im Promotionsfach Psychologie oder einem anderen Promotionsfach besitze.

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass mir die Promotionsordnung der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät II der Humboldt-Universität zu Berlin, die dem Promotionsverfahren zugrunde liegt, bekannt ist.